



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## LABORATORNÍ ÚLOHA NA FILTRY S VYSOKOU SELEKTIVITOU

LABORATORY DEVICE INVOLVING THE HIGH SELECTIVITY FILTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

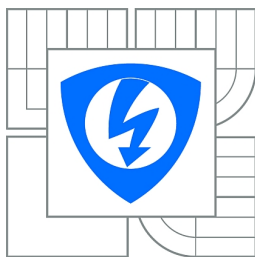
LUBOŠ TUHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Luboš Tuhý

**ID:** 125328

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Laboratorní úloha na filtry s vysokou selektivitou**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Detailně se seznámte s možnostmi realizací elektrických filtrů s vysokou selektivitou, zejména tedy pásmových propustí a zádrží. Teoreticky i prakticky se zaměřte na aplikace krystalů, monolitických a SAW filtrů.

Na základě poznatků z předchozí etapy řešení projektu navrhnete laboratorní úlohu na dané téma a zkonstruujete odpovídající laboratorní přípravek. Součástí práce musí být rovněž postup měření a vzorový protokol.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOSTÁL, T. Teorie elektronických obvodů. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

[2] DOSTÁL, T. Elektrické filtry. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 1997.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou kmitočtových filtrů s vysokou selektivitou. Oblast kmitočtové filtrace je dosti obsáhlou a teoreticky náročnou disciplínou. Snahou této práce není podrobně zahrnout a popsat poznatky o kmitočtových filtrech, nýbrž ujasnit pouze zmíněnou problematiku. Budou zde prakticky popsány filtry pracující na jiných fyzikálních principech, zejména na krystalové filtry s příčkovou strukturou a keramické filtry. Součástí teoretické rozboru budou simulace daných obvodů prostřednictvím programu třídy Spice. Budou zde představeny různé možnosti realizace těchto filtrů a testovacích přípravků sloužících při návrhu. Na základě teoretických poznatků této práce bude vypracováno laboratorní cvičení zabývající se problematikou kmitočtové filtrace a zkonstruování měřícího prototypu. Součástí laboratorního cvičení bude vypracování vzorového protokolu.

# KLÍČOVÁ SLOVA

šířka pásma, význačný kmitočet, pásmová propust, pásmová zádrž, selektivita, krystal, rezonanční obvod, činitel jakosti

# ABSTRACT

This project deals with the frequency filters of high selectivity. The area frequency filtering is fairly comprehensive and theoretically demanding discipline. The aim of this work isn't to describe in detail and to include knowledge of the frequency filters, but only to clarify the aforementioned issues. In particular, we focus practically on filters working on other physical principles, especially on the crystal structure of partition filters and ceramic filters. The circuit simulation programs through classes Spice will be one of the parts of the theoretical analysis. There will be presented various options for implementing these filters, and the test products used in the design. The laboratory exercises dealing with frequency filtering and measuring engineered product will be made and based on the theoretical findings of this work. The laboratory exercises will include the developing of the model protocol.

# KEYWORDS

bandwidth, distinguished frequency, band pass, band reject, selectivity, crystal, resonant circuit, quality factor

TUHÝ, L. Laboratorní úloha na filtry s vysokou selektivitou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 37 s., 21 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní úloha na filtry s vysokou selektivitou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Základní vlastnosti kmitočtových filtrů</b>	<b>2</b>
2.1	Základní typy kmitočtových filtrů .....	3
2.1.1	Dolní propust (low pass).....	3
2.1.2	Horní propust (high pass) .....	4
2.1.3	Pásmová propust (band pass).....	4
2.1.4	Pásmová zádrž (band reject) .....	4
2.2	Způsoby realizace kmitočtových filtrů .....	4
2.2.1	Realizace pomocí diskrétních prvků.....	4
2.2.2	Realizace pomocí integrovaného bloku .....	4
2.2.3	Realizace číslicových filtrů.....	4
<b>3</b>	<b>Fyzikální principy kmitočtových filtrů</b>	<b>5</b>
3.1	Piezoelektrický jev .....	5
3.1.1	Přímý piezoelektrický jev .....	5
3.1.2	Inverzní piezoelektrický jev.....	5
3.2	Piezoelektrické materiály.....	6
<b>4</b>	<b>Krystalové filtry</b>	<b>7</b>
4.1	Simulace – makro model PSpice .....	8
4.2	Návrh testovacího přípravku.....	9
4.3	Simulace krystalu(parametry vypočteny podle katalogového listu).....	11
4.4	Simulace krystalu (parametry vypočteny podle měřícího postupu) .....	12
4.5	Návrh zesilovacího stupně .....	15
4.6	Návrh příčkového filtru s krystalovými rezonátory.....	16
4.6.1	Postup návrhu příčkového filtru <sup>[6]</sup> .....	17
4.6.2	Provedení návrhu .....	18
4.7	Návrh příčkového filtru pomocí programu FILTER DESIGN.....	21
4.7.1	Postup návrhu (FILTER DESIGN).....	21
4.7.2	Provedení návrhu (FILTER DESIGN) .....	22
4.8	Impedanční přizpůsobení.....	23
4.8.1	Napěťový sledovač .....	24
4.8.2	Invertující zesilovač .....	25
<b>5</b>	<b>Keramické filtry</b>	<b>27</b>

5.1	Monolitický piezokeramický filtr .....	28
5.1.1	Přibližné určení parametrů monolitického filtru.....	29
<b>6</b>	<b>Filtry s akustickou povrchovou vlnou (SAW –Surface Acoustic Wave)</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>33</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>34</b>
	<b>Seznam zkratk a symbolů</b>	<b>36</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>38</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Frekvenční charakteristika a) v logaritmických b) komplexních souřadnicích..	3
Obr. 2.2 Fázová charakteristika .....	3
Obr. 2.3 Významné hodnoty šířek propustného pásma <sup>[12]</sup> .....	3
Obr. 2.4 Frekvenční charakteristiky reálných filtrů.....	4
Obr. 3.1 Přímý piezoelektrický jev <sup>[7]</sup> .....	5
Obr. 3.2 Krystal bez přiloženého potenciálu <sup>[2]</sup> .....	5
Obr. 3.3 Chování krystalu při změně orientace přiloženého pole <sup>[2]</sup> .....	5
Obr. 4.1 Profily křemenných destiček <sup>[16]</sup> .....	7
Obr. 4.2 Schématická značka.....	8
Obr. 4.3 Zjednodušené náhradní schéma krystalu .....	8
Obr. 4.4 Náhradní schéma krystalu pro více rezonancí.....	8
Obr. 4.5 Makro model krystalu.....	8
Obr. 4.6 Zjednodušené schéma optimalizovaného přípravku.....	9
Obr. 4.7 Průběh reaktance krystalu <sup>[8]</sup> .....	9
Obr. 4.8 Závislost výstupního napětí pro různé hodnoty dělicího poměru.....	10
Obr. 4.9 Principiální schéma testovacího přípravku .....	10
Obr. 4.10 Fotografie prototypu přípravku .....	10
Obr. 4.11 Obvodové zapojení měření náhradních parametrů krystalu .....	11
Obr. 4.12 Frekvenční (nahore) a fázová (dole) charakteristika krystalu .....	12
Obr. 4.13 Pravděpodobný výskyt sériové rezonance (katalog. hodnoty) .....	12
Obr. 4.14 Vliv vložených kapacit na frekvenční charakteristiku krystalu.....	13
Obr. 4.15 Napěťové úrovně výstupního napětí, $R_s = 30\text{ k}\Omega$ (modrá) .....	14
Obr. 4.16 Závislost výstupního napětí děliče na hodnotě vloženého odporu .....	14
Obr. 4.17 Porovnání metod výpočtu náhradních parametrů krystalu .....	15
Obr. 4.18 Pravděpodobný výskyt sériové rezonance (simulované hodnoty) .....	15
Obr. 4.19 Schéma zapojení zesilovacího stupně.....	16
Obr. 4.20 Možnosti schématického zapojení Čebyševových filtrů <sup>[6]</sup> .....	17
Obr. 4.21 Schéma zapojení testovacího filtru <sup>[6]</sup> .....	18
Obr. 4.22 Fotografie testovacího přípravku .....	18
Obr. 4.23 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou $C_V$ .....	19
Obr. 4.24 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou $C_{VN}$ .....	20
Obr. 4.25 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou $C_{VN}'$ .....	20
Obr. 4.26 Schéma zapojení navrženého filtru s reálnými hodnotami součástek .....	21



Obr. 4.27 Frekvenční charakteristika navrženého filtru 4. řádu .....	21
Obr. 4.28 Propustné pásmo navrženého filtru .....	21
Obr. 4.29 Programem navrhnuté schéma zapojení s hodnotami součástek.....	22
Obr. 4.30 Programová simulace - frekvenční charakteristika navrženého filtru .....	23
Obr. 4.31 Programová simulace - propustné pásmo navrženého filtru .....	23
Obr. 4.32 Schéma zapojení navrženého filtru s reálnými hodnotami součástek .....	23
Obr. 4.33 Napěťový sledovač .....	24
Obr. 4.34 Frekvenční charakteristika napěťového sledovače a AD844 .....	24
Obr. 4.35 Frekvenční závislost výstupní impedance $Z_{out}$ napěťového sledovače.....	25
Obr. 4.36 Invertující zesilovač.....	25
Obr. 4.37 Frekvenční charakteristika invertujícího zesilovače a AD844 .....	26
Obr. 4.38 Frekvenční závislost vstupní impedance $Z_{in}$ zesilovače.....	26
Obr. 4.39 Celkové zapojení krystalového filtru.....	26
Obr. 5.1 Vibrační módy rezonátoru <sup>[13]</sup> .....	27
Obr. 5.2 Kompenzace parazitního přenosu $RO$ <sup>[10]</sup> .....	28
Obr. 5.3 Piezokeramický rezonátor <sup>[10]</sup> .....	28
Obr. 5.4 Náhradní obvod monolitického filtru <sup>[21]</sup> .....	28
Obr. 5.5 Struktura filtru pro 455 kHz <sup>[20]</sup> .....	28
Obr. 5.6 Model monolitického filtru.....	29
Obr. 5.7 Porovnání výstupních průběhů napětí modelů .....	30
Obr. 5.8 Zapojení keramického filtru .....	30
Obr. 6.1 Struktura SAW filtru <sup>[12]</sup> .....	31
Obr. 6.2 Frekvenční charakteristika SAW filtru <sup>[9]</sup> .....	32
Obr. 6.3 Aktivní oblast SAW filtru <sup>[10]</sup> .....	32
Obr. 6.4 Tvar měniče <sup>[10]</sup> .....	32

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Piezoelektrické konstanty <sup>[2]</sup> .....	6
Tabulka 2 Parametry křemenných výbrusů <sup>[16]</sup> .....	7
Tabulka 3 Rychlost šíření v materiálu <sup>[10]</sup> .....	31

# 1 ÚVOD

Tato práce je zaměřena na realizaci elektronických filtrů s vysokou selektivitou. Následující kapitoly se budou věnovat filtrům pracujícím na jiných fyzikálních principech. Do této skupiny spadají krystalové filtry, keramické filtry a filtry s povrchovou akustickou vlnou (SAW), přičemž největší pozornost bude věnována krystalovým a keramickým filtrům. Vyjmenované filtry se zpravidla používají pro realizaci selektivních pásmových propustí nebo zádrží. Jejich vlastnosti jsou specifické a jejich použití nemusí být zrovna vhodné pro určitou aplikaci. Kapitoly se zabývají teoretickým rozбором těchto filtrů. Budou zde popsány a prakticky předvedeny některé možnosti návrhu frekvenčních filtrů příčkové struktury. Pozornost bude zaměřena také na výpočty a měření hodnot náhradních parametrů krystalových rezonátorů. Návrhy kmitočtových filtrů budou podloženy simulacemi v prostředí PSpice a softwaru zaměřeného na návrh krystalových příčkových filtrů Filter Design. Na základě získaných podkladů bude vytvořena laboratorní úloha na zpracovávané téma. Dále bude zkonstruován laboratorní přípravek.

## 2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

Kmitočtový filtr představuje lineární elektrický systém (obvod), jehož úkolem je vybrat požadované harmonické složky signálu, který jím prochází. Filtry lze rozdělit podle jejich činnosti do tří základních skupin:

- 1) selektivní filtry
- 2) korekční filtry
- 3) fázovací obvody

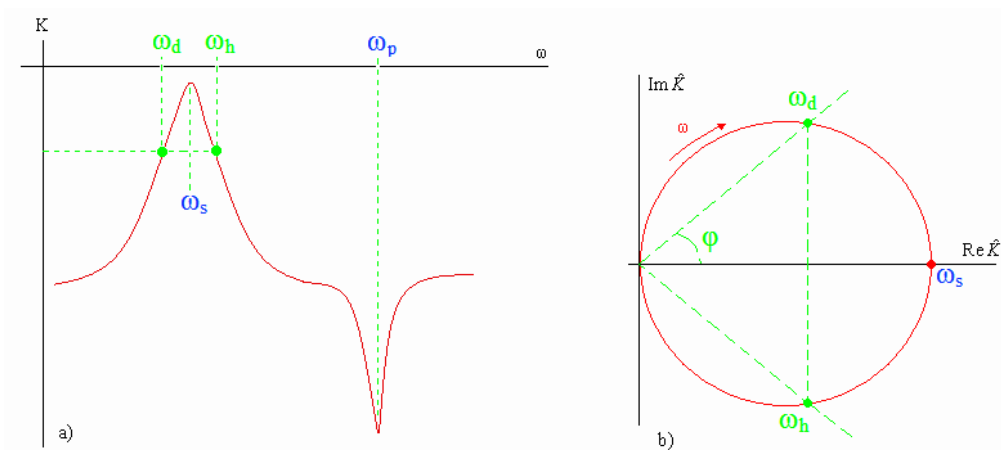
Tato práce je věnována selektivním filtrům. Z názvu je patrné, že se jedná o elektrické obvody, které pracují na základě selekce, neboli výběrovosti určitých kmitočtových složek. Filtr musí zajistit maximální přenos bez útlumu harmonických složek, které mají být propuštěny. Tato frekvenční oblast je nazvána propustným pásmem. Nechtěné kmitočtové složky musí být dostatečně utlumeny. Tato frekvenční oblast se nazývá nepropustným (útlumovým) pásmem. Tyto vlastnosti zachycuje modulová kmitočtová charakteristika (**Obr. 2.1**), která představuje závislost modulu přenosu na kmitočtu. Řád filtru určuje strmost přechodu mezi propustným a nepropustným pásmem. Při požadavku rychlého přechodu mezi propustným a nepropustným pásmem, je nutno volit vyšší řád filtru za cenu složitosti zapojení. Frekvenční charakteristiku lze zobrazit v komplexní Gaussově rovině (**Obr. 2.1b**) nebo v logaritmických souřadnicích (**Obr. 2.1a**). Další charakteristikou popisující vlastnosti filtru je fázová charakteristika (**Obr. 2.2**), ze které je možno určit stabilitu filtru podle definice Bodeho fázové bezpečnosti <sup>[11]</sup>. V časové oblasti lze daný filtr popsat pomocí časové charakteristiky, ze které se určuje časová odezva na vstupní signál. Důležitým parametrem filtru je šířka kmitočtového pásma B, které dokáže filtr přenést. Šířky kmitočtových pásem jsou definovány pro určité významné úrovně výstupního signálu (**Obr. 2.3**). Selektivitu S (2.1) daného filtru se vyjádří jako poměr šířky frekvenčního pásma při poklesu o -3 dB, bráno od maximální hodnoty a šířky frekvenčního pásma při poklesu o -60 dB. Pro vysoce selektivní filtry platí vztah (2.2).<sup>[1][3]</sup>

$$S = \frac{B_{-3dB}}{B_{-60dB}} \quad [-] \quad (2.1)$$

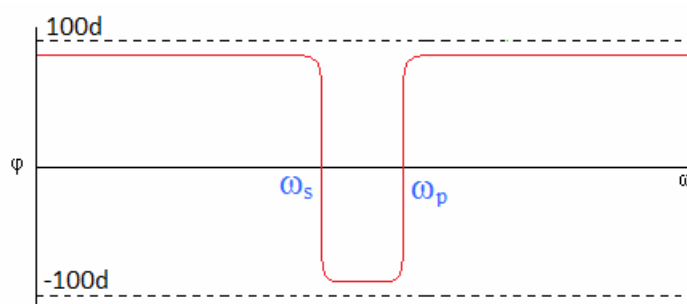
$$S = \frac{B_{-6dB}}{B_{-60dB}} \quad [-] \quad (2.2)$$

Činitelem tvaru k (2.3) <sup>[12]</sup> je určena strmost boků frekvenční charakteristiky. Pro ideální filtr má činitel tvaru hodnotu k = 1. Pro reálné kvalitní filtry nabývá činitel tvaru hodnot 1,1 až 1,4. Na obrázku (**Obr. 2.3**) je zachyceno odečítání zmíněných pásmových veličin.

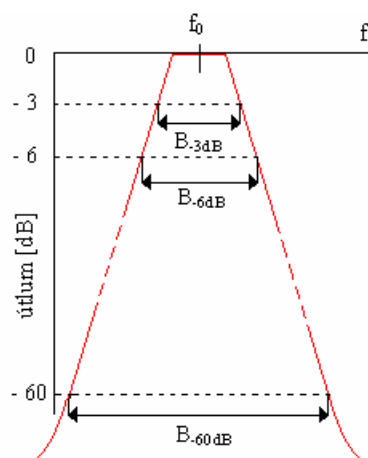
$$k = \frac{B_{-60dB}}{B_{-6dB}} \quad [-] \quad (2.3)$$



Obr. 2.1 Frekvenční charakteristika a) v logaritmických b) komplexních souřadnicích



Obr. 2.2 Fázová charakteristika



Obr. 2.3 Významné hodnoty šířek propustného pásma <sup>[12]</sup>

## 2.1 Základní typy kmitočtových filtrů

Jejich vlastnosti jsou odvozeny z průběhu frekvenčních charakteristik a pro jednotlivé druhy filtrů jsou dány typickým průběhem (*Obr. 2.4*).

### 2.1.1 Dolní propust (low pass)

Propouští signály o kmitočtech nižších, než je mezní kmitočet  $f_m$ . <sup>[3]</sup>

### 2.1.2 Horní propust (high pass)

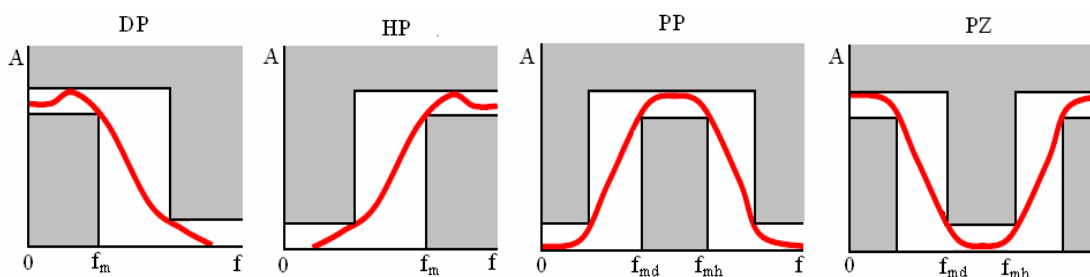
Propouští signály o kmitočtech vyšších, než je mezní kmitočet  $f_m$ .<sup>[3]</sup>

### 2.1.3 Pásmová propust (band pass)

Propouští signály o kmitočtech vyšších, než je dolní mezní kmitočet  $f_{md}$  a nižších, než je horní mezní kmitočet  $f_{mh}$ . Tento frekvenční interval se nazývá propustným pásmem.<sup>[3]</sup>

### 2.1.4 Pásmová zádrž (band reject)

Potlačují signály o kmitočtech vyšších, než je dolní mezní kmitočet  $f_{md}$  a nižších, než je horní mezní kmitočet  $f_{mh}$ . Tento frekvenční interval se nazývá zádržným pásmem.<sup>[3]</sup>



Obr. 2.4 Frekvenční charakteristiky reálných filtrů

## 2.2 Způsoby realizace kmitočtových filtrů

### 2.2.1 Realizace pomocí diskrétních prvků

Tato metoda nabízí rozlehle pole optimalizace při řešení a specifikaci parametrů pro daný filtr. Diskrétní prvky jsou zde zastoupeny součástkami RLC a operačními zesilovači (OZ). Kombinací těchto prvků lze realizovat frekvenční filtr s libovolnou frekvenční charakteristikou.<sup>[1]</sup>

### 2.2.2 Realizace pomocí integrovaného bloku

Jedná se o průmyslově vyhotovené komponenty s různými výrobními parametry, které jsou definovány výrobcem. Nevýhodou je technologické omezení dané výrobou, kterým bývají omezeny případné úpravy filtrů podle potřeby. Dané komponenty se vyrábějí pouze s určitými parametry. Vhodným doplněním diskrétního prvku(-ů) je možno dosáhnout změny některých parametrů, ale pouze jen v omezeném rozsahu.<sup>[1]</sup>

### 2.2.3 Realizace číslicových filtrů

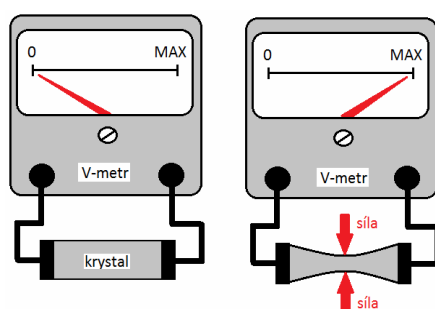
Tyto filtry jsou určeny ke zpracování číslicového signálu. Filtr je definován matematickým modelem, který realizuje požadovanou funkci. Číslicovými filtry lze dosáhnout vlastností, kterých analogovým filtrem nelze dosáhnout. Číslicový filtr lze realizovat jako DP, HP, PP, PZ. Notch filtry jsou realizovány za účelem potlačení specifické frekvence. K návrhu je využita komplexní Z-rovina, ve které jsou zaneseny polohy pólů (maximální přenos) a nulových bodů (nulový přenos).<sup>[3]</sup> Pro zajištění stability musí být póly umístěny uvnitř jednotkové kružnice. Komplexní nulové body a póly musí ležet v komplexně sdružených dvojicích. Ze Z-roviny se získá frekvenční charakteristika filtru.<sup>[1]</sup>

## 3 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

### 3.1 Piezoelektrický jev

#### 3.1.1 Přímý piezoelektrický jev

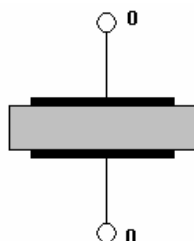
Mechanickým namáháním krystalu je docíleno vzniku potenciálu na jeho plochách. Piezoelektrickými vlastnostmi disponují krystalické látky, které ve své struktuře nemají střed souměrnosti. Nejčastěji je používán křemen nebo sfalerit (sulfid zinečnatý). Výhodou křemene bývá malá závislost piezoelektrického koeficientu na teplotě. Na výrobu krystalů se používá materiál v jehož krystalické mřížce jsou soustředěny kladné a záporné ionty. Výbrus je proveden tak, aby na jedné straně plošky byly orientovány kladné náboje a na druhé záporné náboje. Takto vzniklý výbrus se stává zdrojem elektrostatického pole o určité intenzitě  $E$ . Její velikost je závislá na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř celého materiálu. Rezonanční kmitočty a typy kmitů jsou určeny orientací směru vedeného řezu a rozměrem destičky krystalu. Princip přímého piezoelektrického jevu je zachycen na (Obr. 3.1).<sup>[2][7]</sup>



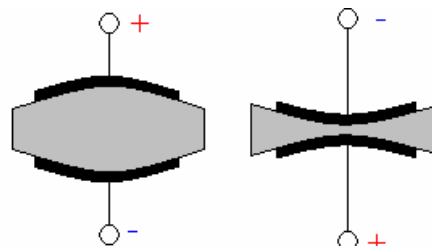
Obr. 3.1 Přímý piezoelektrický jev<sup>[7]</sup>

#### 3.1.2 Inverzní piezoelektrický jev

Inverzní piezoelektrický jev je založen na principu působení vnějšího elektrického pole na krystal. Přivedením potenciálu na krystalovou destičku je způsobena její deformace. Při působení stejnosměrného napětí na elektrodách krystalu se krystal začne v jedné své ose zkracovat nebo prodlužovat. To je ovlivněno orientací přiloženého elektrického pole (Obr. 3.3). Působením střídavého napětí o určité frekvenci je krystal donucen k periodickému prodlužování a zkracování. Rychlost změny stavu mezi prodloužením a zkrácením je ovlivněna kmitočtem přiloženého napětí.<sup>[2][7]</sup>



Obr. 3.2 Krystal bez přiloženého potenciálu<sup>[2]</sup>



Obr. 3.3 Chování krystalu při změně orientace přiloženého pole<sup>[2]</sup>

## 3.2 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické vlastnosti krystalické látky jsou definovány piezoelektem. Ten je definován piezoelektrickou konstantou  $d$  (3.2.1)

$$d = \frac{Q}{F} \left[ C \cdot N^{-1} \right]. \quad (3.2.1)$$

Nejvíce používaný materiál je monokrystal křemene ( $\text{SiO}_2$ ). Jeho krystalová struktura je tetraedrická. Provedením výbrusu je určena hodnota požadované rezonanční frekvence, na které krystal bude kmitat. Lze ji nastavit s přesností  $\pm 0,001\%$ . Vlivem malého součinitele teplotní roztažnosti ( $\sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) je frekvence teplotně nezávislá. Pro zajištění lepší stability se krystaly umísťují do termostatu. Vinan sodno-draselný (Seignettova sůl –  $\text{KNAC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) je v současné době považován za nejsilnější piezoelektrický materiál. Nastává zde problém, že je rozpustný ve vodě. Jedná se o nestabilní látku. Krystalovou strukturou, ke které je přichycena přírodní kovová elektroda je postupem času uvolňována na povrch krystalická voda a dochází k narušení kontaktu elektrody. Tato skutečnost nemá nic společného s pronikáním vnější vlhkosti do krystalu. Následkem je odpadnutí elektrody. Tento děj trvá přibližně jeden rok. Z tohoto důvodu bylo od vinanových výbrusů opuštěno a přešlo se na křemenné výbrusy.<sup>[2]</sup>

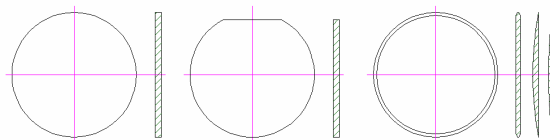
Tabulka 1 Piezoelektrické konstanty <sup>[2]</sup>

Hodnoty platí pro řez X ( $\sigma = 45^\circ$ )		
materiál	sumární vzorec	piezoelektrická konstanta
Vinan sodno-draselný	$\text{KNAC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$435 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$
Oxid křemičitý	$\text{SiO}_2$	$2,25 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$
Baryumtitanát	$\text{BaTi}_3$	$(130-160) \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$



## 4 KRYSTALOVÉ FILTRY

Krystalové rezonátory se chovají jako velice jakostní obvodové prvky. Číselník jakosti  $Q$  krystalu nabývá hodnot  $10^5$  až  $10^6$ . Vynikají vysokou selektivitou a dobrou kmitočtovou stabilitou. Díky svým vlastnostem jsou využity pro konstrukci vysoce selektivních pásmových propustí. K výrobě jsou použity syntetické křemenné krystaly, které jsou specifikovány dle normy EN/IEC 60758:2004. Ta je zaměřena na stupeň kvality, stupeň inkluzí a hustotu leptacích kanálků.<sup>[16]</sup> Krystalový výbrus má několik rezonančních kmitočtů, je využito pouze jednoho, potřebného pro zvolenou aplikaci. Křemenné výbrusy představují tenké destičky získané z krystalu křemene. Tloušťka výbrusu se pohybuje okolo 1mm. Destičky jsou vyříznuty z krystalu pod určitým úhlem  $\sigma$ . Je možno realizovat mnoho druhů řezů, které jsou tříděny do skupin AT, BT, CT, DT, X a Y. Nejvíce využívanými řezy jsou AT ( $\sigma = 55^\circ$ ) a BT ( $\sigma = 139^\circ$ ).<sup>[9]</sup> Volba řezu úzce souvisí s teplotní stabilitou. Krystalové destičky jsou podrobeny povrchovým úpravám, aby se dosáhlo požadovaných vlastností. Tvar výbrusu je nejčastěji kulatý, se zkoseným nebo nezakoseným povrchem a opatřený vývody (**Obr. 4.1**). Takto ošetřená destička je umístěna do kovového či skleněného držáku.



Obr. 4.1 Profily křemenných destiček <sup>[16]</sup>

Tabulka 2 Parametry křemenných výbrusů <sup>[16]</sup>

Typické parametry křemenných výbrusů		
parametr	maximum	minimum
průměr [mm]	$4,0 \pm 0,02$	$20,0 \pm 0,02$
tloušťka [mm]	$0,004 \pm 0,001$	1,0 a více
tolerance úhlu řezu	$\pm 15''$ (řez AT)	$\pm 30'$

Krystal lze znázornit pomocí úplného náhradního obvodu, ve kterém je zahrnuto několik rezonančních kmitočtů (**Obr. 4.4**). Pro praktické využití se používá obvod zjednodušený (**Obr. 4.3**). Z obvodového hlediska představuje krystal sériový rezonanční obvod s velkým činitelem jakosti. Sériový odpor  $R_S$  a sériová kapacita  $C_S$  jsou malé a sériová indukčnost  $L_S$  je velká.<sup>[10]</sup> Paralelní kapacita  $C_d$  charakterizuje kapacitu držáku, ve kterém je uchycena krystalová destička. Vlivem kapacity  $C_d$  se v blízkosti rezonanční frekvence  $f_S$  (4.1)<sup>[13]</sup> objevuje paralelní rezonance na kmitočtu  $f_P$  (4.2)<sup>[13]</sup>, na které se vyskytuje minimální přenos krystalového rezonátoru. Pro vyjádření sériové rezonanční frekvence se využívá Thomsonova vztahu (4.1).<sup>[13]</sup>

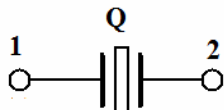
$$f_S = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_S \cdot C_S}} \quad [Hz] \quad (4.1)$$

$$f_P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_S} \cdot \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_d} \right)} \quad [Hz] \quad (4.2)$$

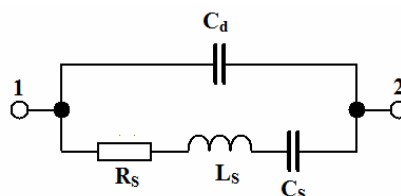
Číselník jakosti krystalu je definován vztahem (4.3).<sup>[13]</sup>

$$Q = \frac{\omega_S \cdot L_S}{R_S} = \frac{1}{\omega_S \cdot C_S \cdot R_S} \quad [-] \quad (4.3)$$

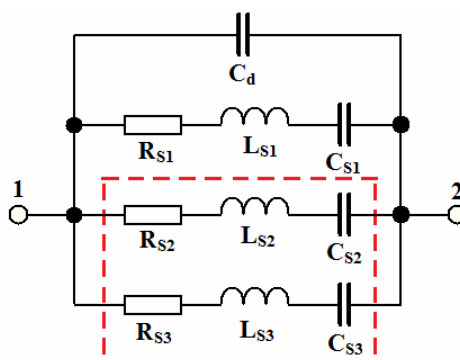
Krystalové filtry disponují řadou dobrých vlastností. V nepropustném pásmu je možno dosáhnout potlačení až 90 dB. Dobré vlastnosti jsou vykoupeny náročností výroby krystalových výbrusů. Nevýhodou je omezená změna rezonančního kmitočtu.<sup>[13]</sup>



Obr. 4.2 Schématická značka



Obr. 4.3 Zjednodušené náhradní schéma krystalu



Obr. 4.4 Náhradní schéma krystalu pro více rezonancí

## 4.1 Simulace – makro model PSpice

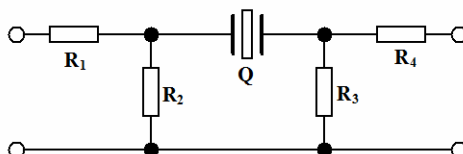
Pro obvodové simulace bude využito prostředí PSpice. Krystaly v knihovně XTAL jsou pro individuální návrh nepoužitelné, protože mají pevně definované parametry. Není doporučeno zasahovat do originálních knihoven.<sup>[11]</sup> Byla snaha vytvořit univerzální model krystalu, u kterého bude možné snadno měnit jeho vlastnosti pomocí parametrů náhradního obvodu. Za tímto účelem byl vytvořen textový model (*Obr. 4.5*) náhradního modelu krystalu pro jednu význačnou rezonanci, u kterého je možné hned po vložení schématické značky editovat hodnoty parametrů náhradního zapojení.

```
*nahradni model krystaloveho rezonatoru
*kapacita drzaku (Cd)-----|
*seriova kapacita (Cs)-----|
*seriova indukcnost (Ls)-----|
*seriovy odpor (Rs)-----|
*output-----|
*input-----|
.SUBCKT XTAL 1 4 params: R1=30k L1=9k C1=1p C2=1f
R1 1 2 {R1}
L1 2 3 {L1}
C1 3 4 {C1}
C2 1 4 {C2}
.ENDS
```

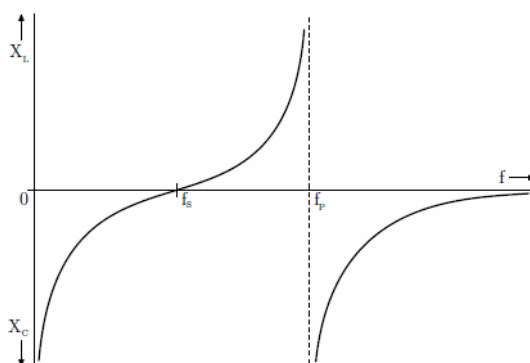
Obr. 4.5 Makro model krystalu

## 4.2 Návrh testovacího přípravku

Přípravek se skládá ze vstupního a výstupního odporového děliče (**Obr. 4.6**). Mezi děliče je vložen testovaný krystal. Odporovými děliči je zajištěno souměrné zatížení krystalu. Je nutno stanovit vhodné dělicí poměry. Impedance krystalu je frekvenčně závislá (**Obr. 4.7**). Na frekvenčním intervalu  $f \in (0; f_S)$  se krystal chová jako kapacitor, na frekvencích  $f \in (f_S; f_P)$  jako induktor. Pro zjednodušení bude uvažována míra přenosu pouze na jedné frekvenci. Při rezonanci je hodnota impedance krystalu  $Z_Q(\omega)$  rovna sériovému odporu  $R_S$ . Velikost sériového odporu ovlivňuje šíři propustného pásma B. Čím bude hodnota sériového odporu větší, bude větší i šířka pásma.



Obr. 4.6 Zjednodušené schéma optimalizovaného přípravku



Obr. 4.7 Průběh reaktance krystalu <sup>[8]</sup>

Vlivem symetrického zatížení:  $R_1 = R_4 = R_x = \frac{1}{G_x}$ ,  $R_2 = R_3 = R_y = \frac{1}{G_y}$

Sestrojení admitanční matice podle testovacího obvodu (**Obr. 4.6**):

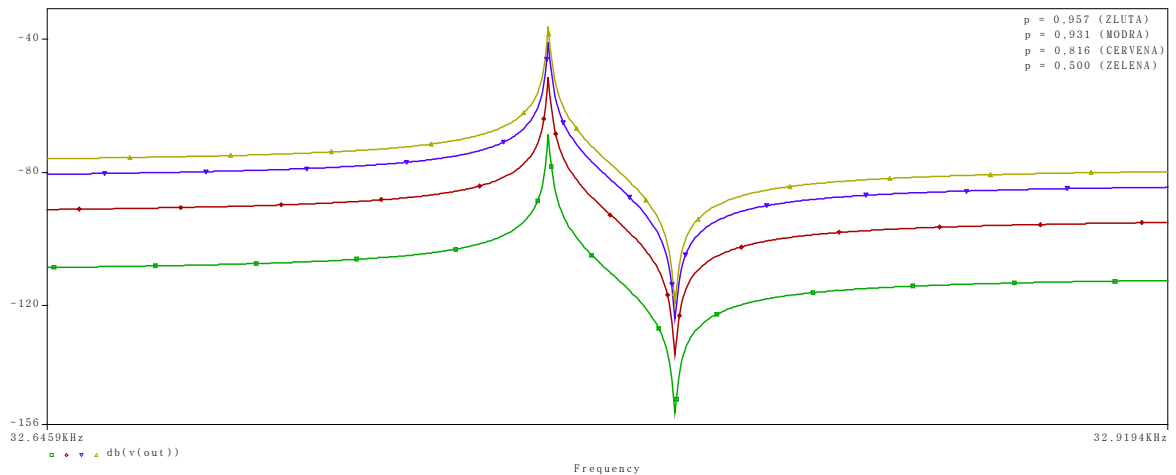
$$\begin{pmatrix} G_x & -G_x & 0 & 0 \\ -G_x & G_x + G_y + G_Q & -G_Q & 0 \\ 0 & -G_Q & G_x + G_y + G_Q & -G_x \\ 0 & 0 & -G_x & G_x \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{14} = (-1)^5 \begin{vmatrix} -G_x & G_x + G_y + G_Q & -G_Q \\ 0 & -G_Q & G_x + G_y + G_Q \\ 0 & 0 & -G_x \end{vmatrix} = G_x^2 G_Q$$

$$\Delta_{11} = (-1)^2 \begin{vmatrix} G_x + G_y + G_Q & -G_Q & 0 \\ -G_Q & G_x + G_y + G_Q & -G_x \\ 0 & -G_x & G_x \end{vmatrix} = G_x(G_x G_y + G_x G_Q + G_y^2 + 2G_y G_Q)$$

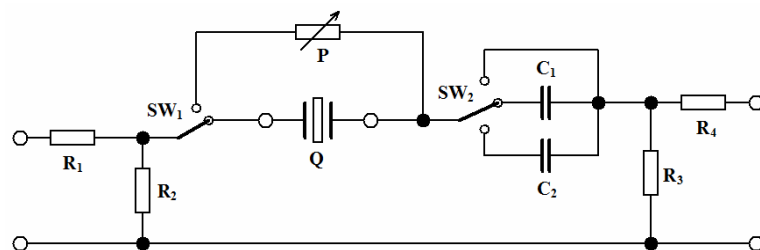
Napěťový přenos je získán poměrem výstupního a vstupního napětí.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_{14}}{\Delta_{11}} = \frac{G_x^2 G_Q}{G_x(G_x G_y + G_x G_Q + G_y^2 + 2G_y G_Q)} = \frac{G_x G_Q}{G_x(G_y + G_Q) + G_y(G_y + 2G_Q)}$$



Obr. 4.8 Závislost výstupního napětí pro různé hodnoty dělicího poměru

Na základě analýzy obvodu byl zvolen vhodný dělicí poměr (**Obr. 4.8**). Principiální zapojení kompletního testovacího přípravku je nakresleno na obrázku (**Obr. 4.9**). Potenciometr P slouží ke stanovení sériového odporu  $R_S$  krystalu.

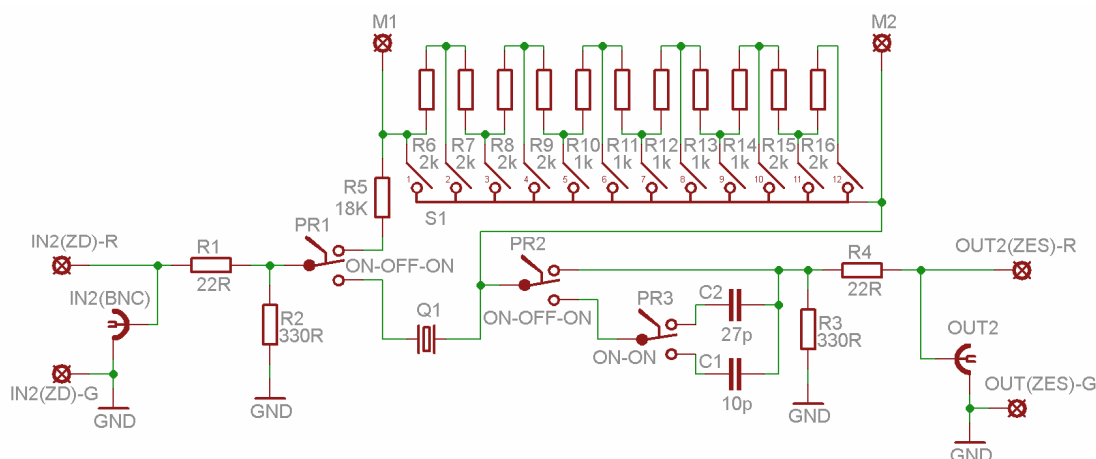


Obr. 4.9 Principiální schéma testovacího přípravku



Obr. 4.10 Fotografie prototypu přípravku

Při měření na testovacím přípravku bylo zjištěno, že použití potenciometru s uhlíkovou drážkou není vhodné. Výstupní signál byl znehodnocen velkým množstvím šumu. Místo něj byla použita varianta otočného přepínače s váhovými odpory. Hodnoty rezistorů byly voleny tak, aby pokryly pásmo výskytu sériového odporu  $R_S$ .



Obr. 4.11 Obvodové zapojení měření náhradních parametrů krystalu

### 4.3 Simulace krystalu (parametry vypočteny podle katalogového listu)

Byl vybrán krystal MTF32 (32,768 kHz)<sup>[15]</sup>, pro který budou stanoveny jednotlivé parametry náhradního obvodu  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $C_s$ ,  $C_d$ .

Hodnota sériového odporu je uvedena přímo:

$$R_{S\text{MAX}} (ESR) = 30 \text{ k}\Omega$$

z poměru  $C_d/C_s$  se vypočítá hodnota sériové kapacity  $C_s$ :

$$\frac{C_d}{C_s} = 530 \text{ (typical)} \Rightarrow C_s = \frac{C_d}{530} = \frac{1,3 \cdot 10^{-12}}{530} = 2,4528 \text{ fF}$$

pomocí Thomsonova vztahu (4.1) se určí velikost sériové indukčnosti:

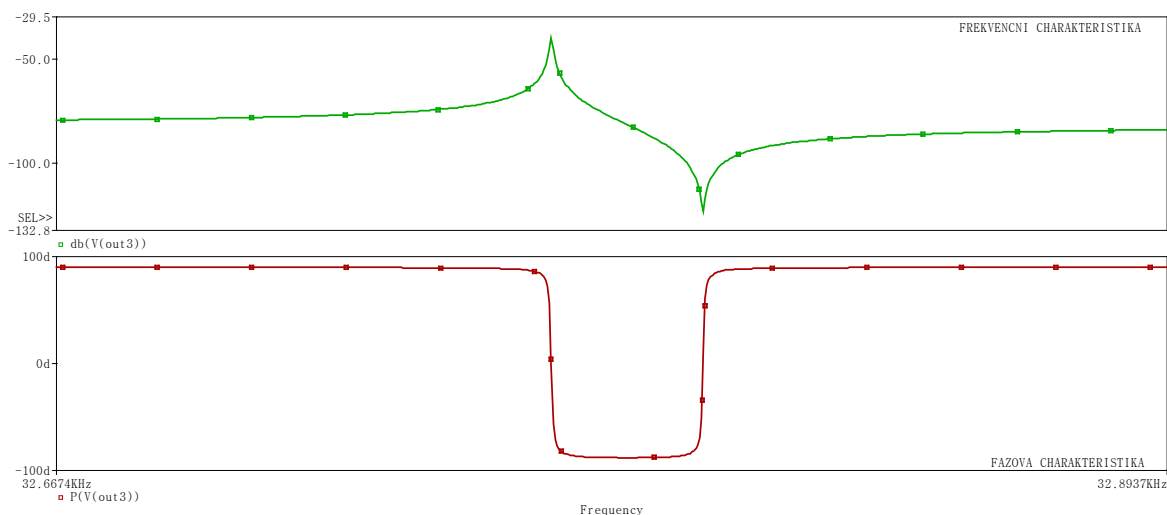
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \Rightarrow L_s = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_s^2 \cdot C_s} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 32768^2 \cdot 2,4528 \cdot 10^{-15}} = 9617,8556 \text{ H}$$

vztahu (4.2) bude určena hodnota paralelní rezonance:

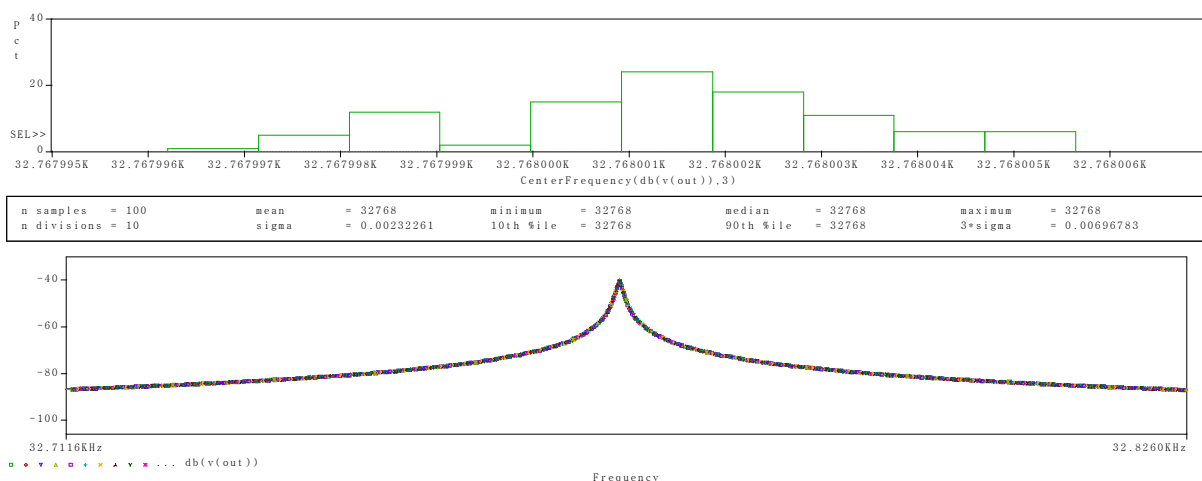
$$f_P = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_s} \cdot \left( \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_s} \right)} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{9617,8556} \cdot \left( \frac{1}{1,3 \cdot 10^{-12}} + \frac{1}{2,4528 \cdot 10^{-15}} \right)} = 32,798 \text{ kHz}$$

činitel jakosti (4.3) krystalu bude:

$$Q = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C_s \cdot R_s} = \frac{1}{2\pi \cdot 32768 \cdot 2,4528 \cdot 10^{-15} \cdot 30 \cdot 10^3} = 6,6006 \cdot 10^4$$



Obr. 4.12 Frekvenční (nahore) a fázová (dole) charakteristika krystalu



Obr. 4.13 Pravděpodobný výskyt sériové rezonance (katalog. hodnoty)

## 4.4 Simulace krystalu (parametry vypočteny podle měřícího postupu)

Sériovým zařazením kapacitoru ke krystalu je ovlivněna poloha frekvence sériové rezonance  $f_S$ . Na paralelní rezonanci  $f_P$  nemá vložený kapacitor žádný vliv (**Obr. 4.14**). Největšího navýšení hodnoty sériového rezonančního kmitočtu je dosaženo při použití menší hodnoty kapacity. Čím více se bude zvětšovat vložená sériová kapacita, bude se rezonanční špička přibližovat k hodnotě kmitočtu samotného krystalového rezonátoru. Tuto změnu lze provádět pouze v omezeném rozsahu. Pro hodnoty rezonančních kmitočtů platí (4.4.1).<sup>[5][4]</sup>

$$f_S < f_{S(C1)} < f_{S(C2)} < f_P \quad (4.4.1)$$

$f_S$  - sériová rezonanční frekvence samotného krystalového rezonátoru

$f_{S(C1)}$  - sériová rezonanční frekvence s kapacitorem C1

$f_{S(C2)}$  - sériová rezonanční frekvence s kapacitorem C2

$f_P$  - paralelní rezonanční frekvence krystalového rezonátoru

Vztah (4.4.1) platí za podmínky:

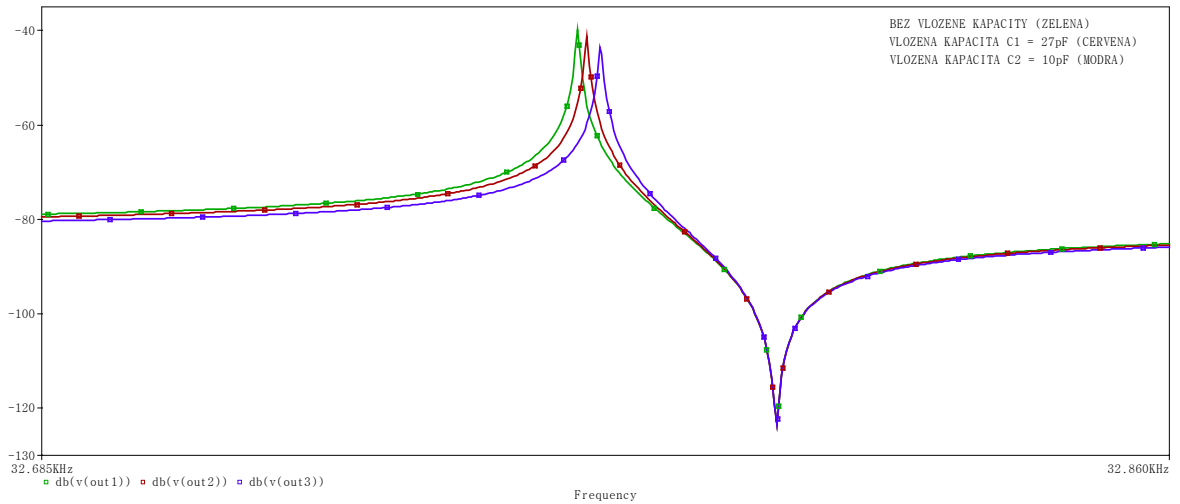
$$C_2 < C_1 \quad (4.4.2)$$

Pomocí níže uvedených vztahů se vypočítají parametry náhradního zapojení [5].

$$C_S = \frac{2(C_1 - C_2) \cdot (f_S(C_2) - f_S) \cdot (f_S(C_1) - f_S)}{f_S \cdot (f_S(C_2) - f_S(C_1))} \quad [pF; pF, MHz] \quad (4.4.3)$$

$$L_S = \frac{1}{(2\pi \cdot f_S)^2 \cdot C_S} \quad [H; MHz, pF] \quad (4.4.4)$$

$$C_P = \frac{C_S}{2 \cdot \left( \frac{f_P}{f_S} - 1 \right)} \quad [pF; pF, MHz] \quad (4.4.5)$$



Obr. 4.14 Vliv vložených kapacit na frekvenční charakteristiku krystalu

Potřebné hodnoty rezonančních kmitočtů byly získány simulací (**Obr. 4.14**). Pomocí vztahů (4.4.3) až (4.4.5) se stanoví hodnoty parametrů náhradního schématu.

$$\begin{aligned} C_S &= \frac{2(C_1 - C_2) \cdot (f_S(C_2) - f_S) \cdot (f_S(C_1) - f_S)}{f_S \cdot (f_S(C_2) - f_S(C_1))} = \\ &= \frac{2(27 - 10) \cdot (0,032772 - 0,032768) \cdot (0,032769 - 0,032768)}{0,032768 \cdot (0,032772 - 0,032769)} = 1,3834 \cdot 10^{-3} \text{ pF} \end{aligned}$$

$$L_S = \frac{1}{(2\pi \cdot f_S)^2 \cdot C_S} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,032768)^2 \cdot 1,384 \cdot 10^{-3}} = 17045,2864 \text{ H}$$

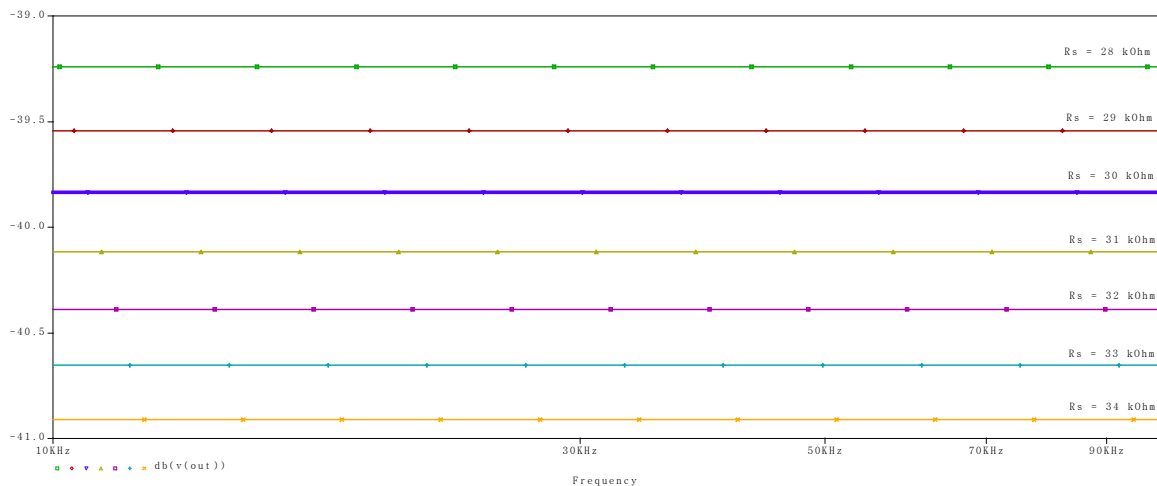
$$C_P = \frac{C_S}{2 \cdot \left( \frac{f_P}{f_S} - 1 \right)} = \frac{1,3834 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \left( \frac{0,032799}{0,032768} - 1 \right)} = 0,7311 \text{ pF}$$

Místo krystalu se zapojí rezistor R jehož hodnota odporu bude rozmítána v určitém intervalu. Vložený rezistor R se roven sériovému odporu  $R_S$  krystalu tehdy, když se rovná výstupní napětí

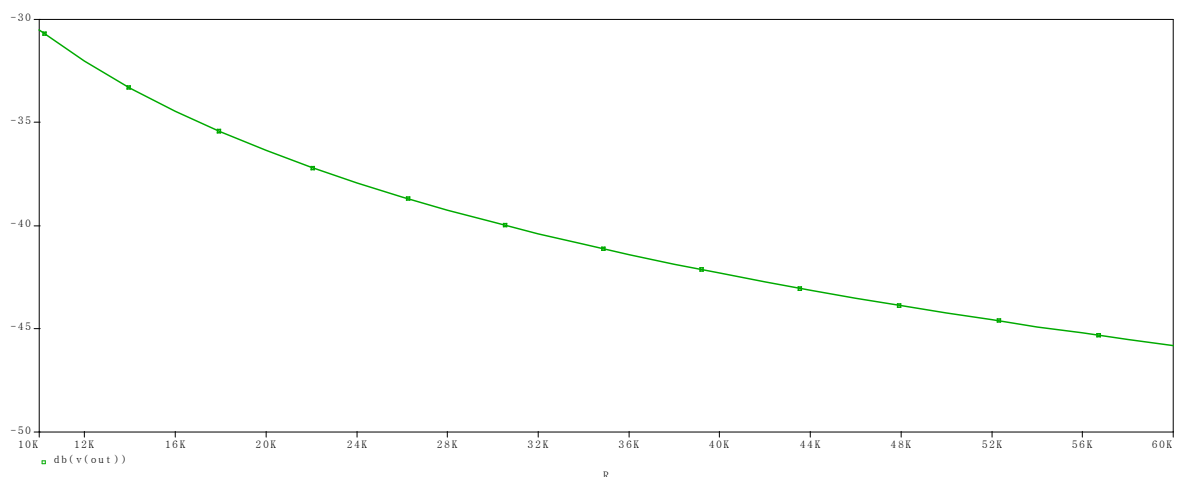
odporového děliče a výstupní napětí dosažené při rezonanci samotného krystalu.<sup>[4]</sup>

$$R_S = 30 \text{ k}\Omega$$

Obrázek (**Obr. 4.15**) zachycuje napěťové úrovně výstupního napětí odporového děliče. Zvýrazněná napěťová úroveň odpovídá hodnotě výstupního napětí při rezonanci. Při změně hodnoty vloženého odporu se mění výstupní napětí. Průběh této změny je zachycen na obrázku (**Obr. 4.16**).



Obr. 4.15 Napěťové úrovně výstupního napětí,  $R_S = 30 \text{ k}\Omega$  (modrá)



Obr. 4.16 Závislost výstupního napětí děliče na hodnotě vloženého odporu

Ze znalosti hodnot náhradních parametrů se stanoví frekvence sériové  $f_S$  (4.1) a paralelní  $f_P$  (4.2) rezonance.

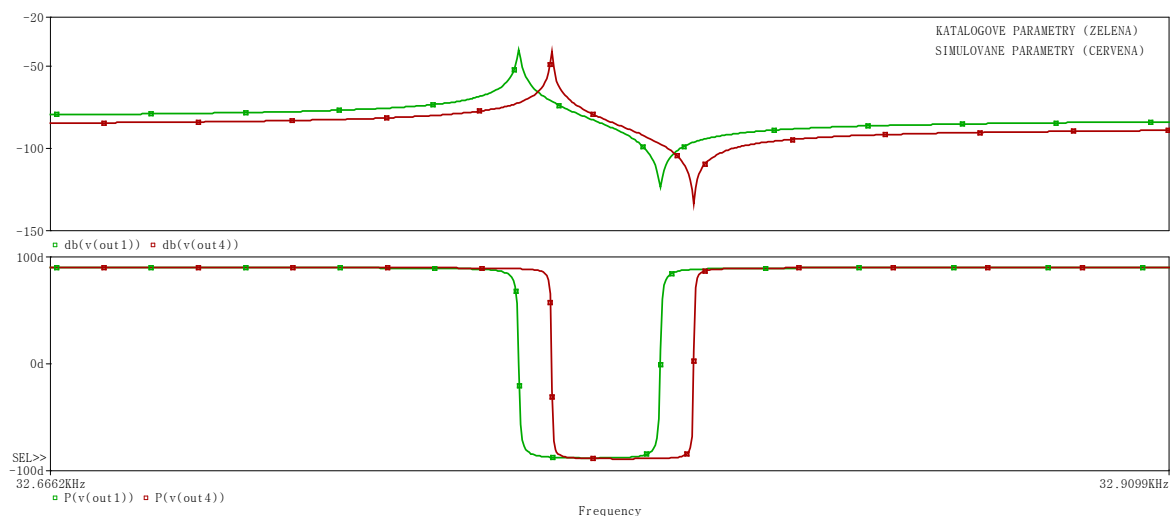
$$f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S \cdot C_S}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{17045,2864 \cdot 1,3834 \cdot 10^{-15}}} = 32,775 \text{ kHz}$$

$$f_P = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_S} \cdot \left( \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_S} \right)} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{17045,2864} \cdot \left( \frac{1}{10,7311 \cdot 10^{-12}} + \frac{1}{1,3834 \cdot 10^{-15}} \right)} = 32,806 \text{ kHz}$$

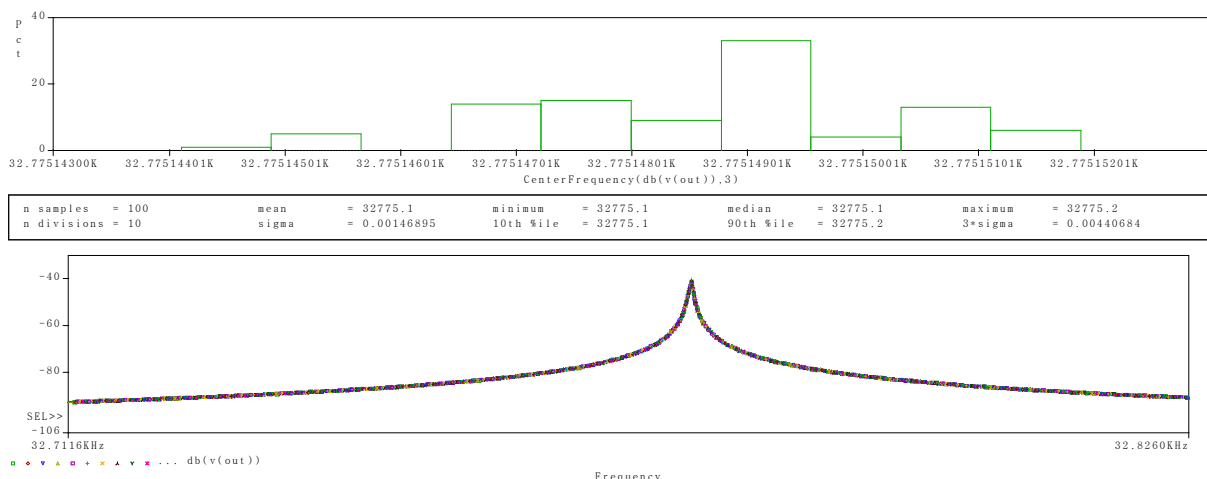
Činitel jakosti krystalu (4.3):

$$Q = \frac{1}{2\pi \cdot f_S \cdot C_S \cdot R_S} = \frac{1}{2\pi \cdot 32775 \cdot 1,3834 \cdot 10^{-15} \cdot 30 \cdot 10^3} = 11,7006 \cdot 10^4$$





Obr. 4.17 Porovnání metod výpočtu náhradních parametrů krystalu



Obr. 4.18 Pravděpodobný výskyt sériové rezonance (simulované hodnoty)

## 4.5 Návrh zesilovacího stupně

Z výše provedených simulací vyplývá, že krystal MTF32 má poměrně velký vložný útlum. Za těchto podmínek by byl v laboratorních podmínkách obtížně měřitelný. Vložný útlum bude kompenzován zesílením výstupního signálu. Za tímto účelem byl navrhnut zesilovací stupeň s operačními zesilovači (**Obr. 4.19**), který představuje kaskádní zapojení dvou neinvertujících zesilovačů. Neinvertující zesilovač má velký vstupní odpor a nezatěžuje tak okolní obvody. Pro návrh byl použit obvod OP37G.<sup>[17]</sup> Každý neinvertující zesilovač bude mít zisk  $G = 20$  dB. Zisk celého stupně bude 40 dB. Rezistor  $R_{21}$  slouží jako ochrana výstupu.

$$G_{celk} = G_1 + G_2 = 20 + 20 = 40 \text{ dB}$$

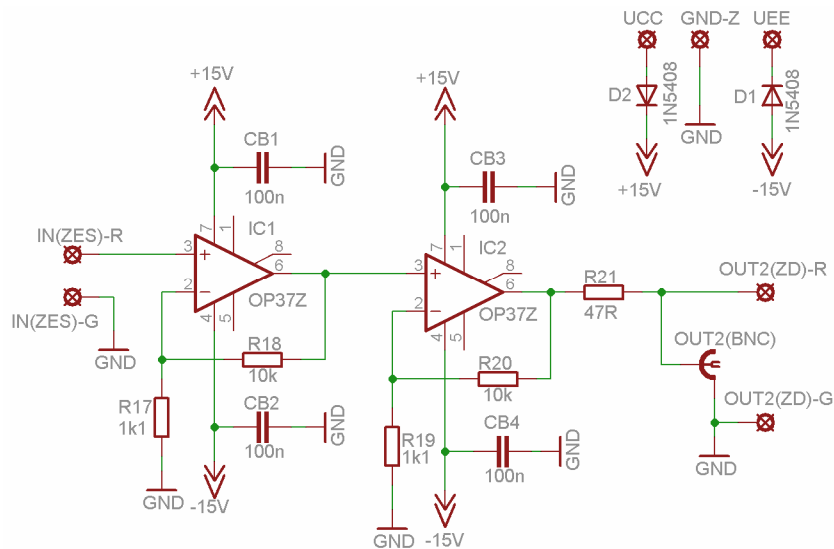
$$G_1 = G_2 = 20 \text{ dB} \Rightarrow Au = 10^{\frac{20}{10}} = 10$$

$$Au = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{17} + R_{18}}{R_{17}} = 1 + \frac{R_{18}}{R_{17}}$$

Hodnota zpětnovazebních rezistorů byla zvolena 10 kΩ

$$R_{18} = R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$$

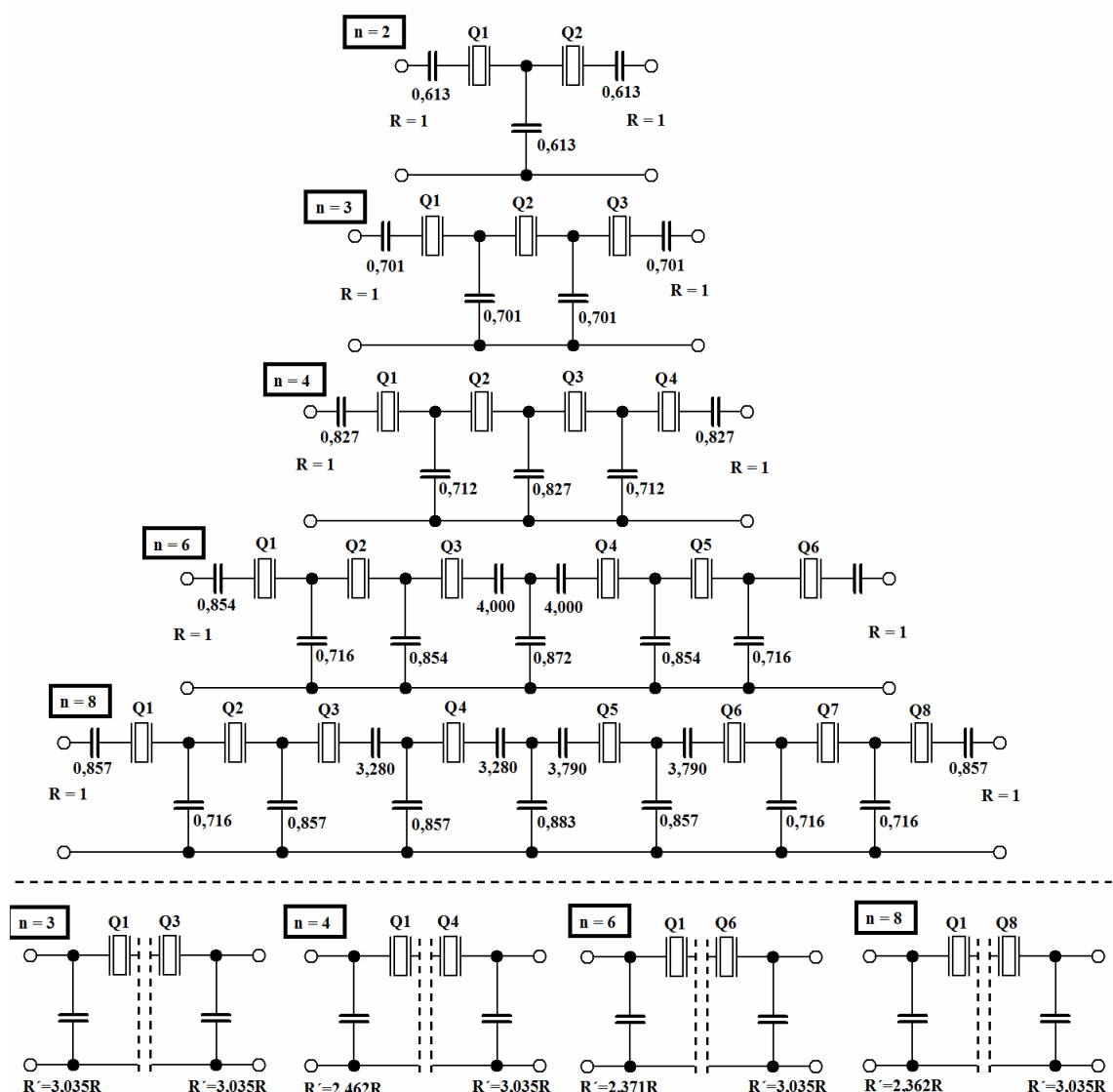
$$R_{17} = R_{19} = \frac{R_{18}}{A_u - 1} = \frac{10 \cdot 10^3}{10 - 1} = 1111,1 \Omega \approx 1,1 \text{ k}\Omega$$



Obr. 4.19 Schéma zapojení zesilovacího stupně

## 4.6 Návrh příčkového filtru s krystalovými rezonátory

Příčkové filtry vycházejí z kaskádního řazení rezonančních obvodů, které jsou vázány sériovými a paralelními vazebními kapacitami. Vazba může být i induktivní. Vhodným sériovým řazením těchto bloků se získají filtry soustředné selektivity. Existuje mnoho zapojení lišící se složitostí nebo vlastnostmi. Zapojení příčkových filtrů je znázorněno na obrázku (**Obr. 4.20**), jedná se o Čebyšovovy filtry. U každého schématu je uvedena hodnota  $n$ , která vyjadřuje celočíselnou hodnotu a odpovídá řádu filtru, neboli počtu krystalů, ze kterých je filtr složen. Ve spodní části obrázku (**Obr. 4.20**) jsou zobrazeny transformace svorkových impedancí filtru. Změnou vstupních a výstupních sériových kondenzátorů za paralelní se dosáhne zvýšení svorkových impedancí filtru.<sup>[4][8]</sup>



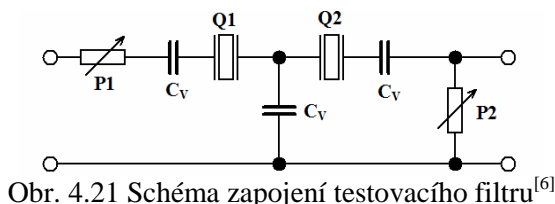
Obr. 4.20 Možnosti schématického zapojení Čebyševových filtrů<sup>[6]</sup>

#### 4.6.1 Postup návrhu příčkového filtru<sup>[6]</sup>

- 1) Volbě krystalu je potřeba věnovat značnou pozornost. Nejprve se musí zvolit význačný kmitočet  $f_s$  krystalových rezonátorů, ze kterých bude prováděn návrh. Do určitého kmitočtu (cca 4 MHz) hrozí, že křivka propustnosti frekvenční charakteristiky bude nakloněná na jednu stranu. Krystaly s rezonančním kmitočtem do 4MHz nejsou příliš vhodné pro realizaci filtrů. Dalším parametrem, který je nutno stanovit je řád filtru s ohledem na složitost zapojení a požadované vlastnosti daného filtru. Sériové rezonanční kmitočty jednotlivých použitých krystalů by se měly co nejméně lišit. Povolena odchylka parametrů krystalu se pohybuje v desítkách Hz.<sup>[8]</sup> Kompenzaci rozptylu výrobních parametrů lze částečně provést optimalizací schématu zapojení (změnami hodnot vazebních kapacit).
- 2) Dalším bodem návrhu je sestavení testovacího přípravku, který představuje jednoduchý filtr 2. řádu. Schéma přípravku je zobrazeno na obrázku (**Obr. 4.21**). Zvolí se hodnota vazebních kapacit  $C_v$ . Její hodnota je libovolná. Univerzální hodnota vazební kapacity se volí 33pF.<sup>[6]</sup> Potenciometrickými trimry P1 a P2 se nastavuje vstupní a zatěžovací impedance filtru. Hodnota odporu se vypočítá ze vztahu (4.6.1.2), kde  $k$  je koeficient hodnoty kondenzátoru. Potenciometr P2 se nastaví přímo na

vypočítanou hodnotu  $R$ . Hodnota potenciometru  $P1$  se koriguje hodnotou výstupního odporu generátoru pomocí vztahu (4.6.1.3),  $R_G$  je výstupní odpor generátoru.

$$C = \frac{k \cdot 10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot R} \quad [pF; -MHz, \Omega] \quad (4.6.1.1)$$



Obr. 4.21 Schéma zapojení testovacího filtru<sup>[6]</sup>



Obr. 4.22 Fotografie testovacího přípravku

$$R = \frac{k \cdot 10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot C} \quad [\Omega; -, MHz, pF] \quad (4.6.1.2)$$

$$R_{P1} = R - R_G \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (4.6.1.3)$$

- 3) Nyní se odečte hodnota šířky pásma  $B_1$  pro pokles o -3 dB.

Testovací přípravek se osadí jinou hodnotou vazebního kondenzátoru  $C_V$ . Opět je provedeno měření šířky propustného pásma testovacího kmitočtového filtru. Nesmí se zapomenout přepočítat hodnoty vstupní a zatěžovací impedance filtru podle vztahu (4.6.1.2) již s novou hodnotou vazební kapacity.

- 4) Bylo zjištěno, že šířka propustného pásma  $B$  je nepřímo úměrná druhé odmocnině hodnotě velikosti hodnoty vazebního kondenzátoru  $C_V$ . Pomocí vztahu (4.6.1.4) se vypočítá požadovaná hodnota vazební kapacity pro zvolenou šířku pásma  $B_2$ .

$$C_{VN} = C_V \cdot \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^2 \quad [pF; pF, Hz] \quad (4.6.1.4)$$

- 5) Do testovacího obvodu se zapojí kondenzátory s vypočtenou kapacitou. Musí se upravit impedanční přizpůsobení frekvenčního filtru (4.6.1.2). Provede se měření šíře propustného pásma  $B$ . Je-li dosaženo uspokojivého výsledku, pomocí poslední stanovené hodnoty odporu vypočteme kapacitu  $C$ . Ta je definována vztahem (4.6.1.5).

$$C = \frac{10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot R} \quad [pF; MHz, \Omega] \quad (4.6.1.5)$$

- 6) Skutečné hodnoty vazebních kapacit pro konkrétní zvolené zapojení se získají vynásobením kapacity  $C$  a koeficientem kondenzátoru na příslušné pozici.

## 4.6.2 Provedení návrhu

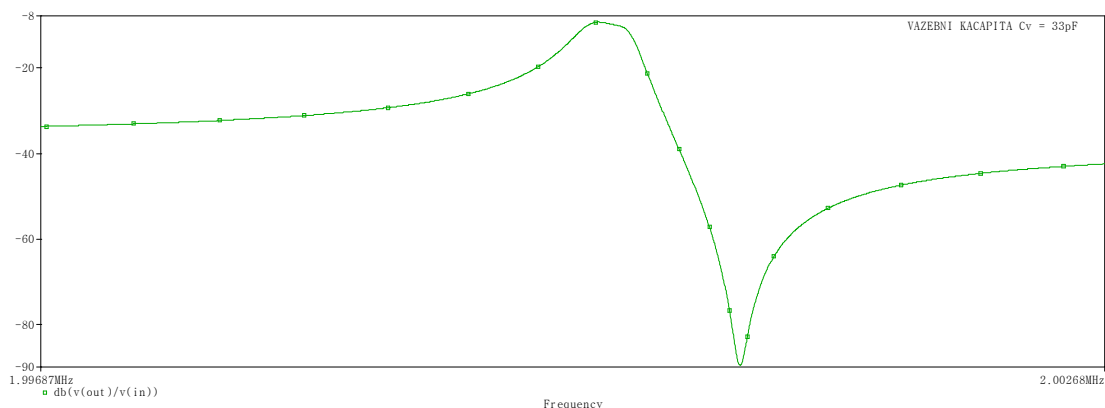
- 1) Pro návrh byl zvolen krystal s rezonanční frekvencí  $f_s = 2 \text{ MHz}$ .<sup>[14]</sup> Navrhovaný filtr bude filtr 4. řádu. Budou-li parametry jednotlivých krystalů téměř identické, bude dosaženo lepších výsledků. Při požadavku přesnosti filtru je výhodnější koupit více krystalů a proměřit jejich vlastnosti. Vlastní návrh potom se provede z krystalů, které mají nejmenší rozptyl parametrů.

- 2) Počáteční hodnota vazební kapacity byla zvolena  $C_V = 33\text{pF}$ . Pomocí vztahu (4.6.1.2) se vypočítají příslušné impedance filtru. S rostoucí vazební kapacitou bude hodnota odporu  $R$  klesat.

$$C_V = 33\text{pF}$$

$$R = \frac{k \cdot 10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot C_V} = \frac{0,613 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 2 \cdot 33} = 1478,2 \Omega$$

- 3) Z kmitočtové charakteristiky se odečte hodnota šířky pásma  $B_1$  pro pokles o -3 dB (**Obr. 4.23**).



Obr. 4.23 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou  $C_V$

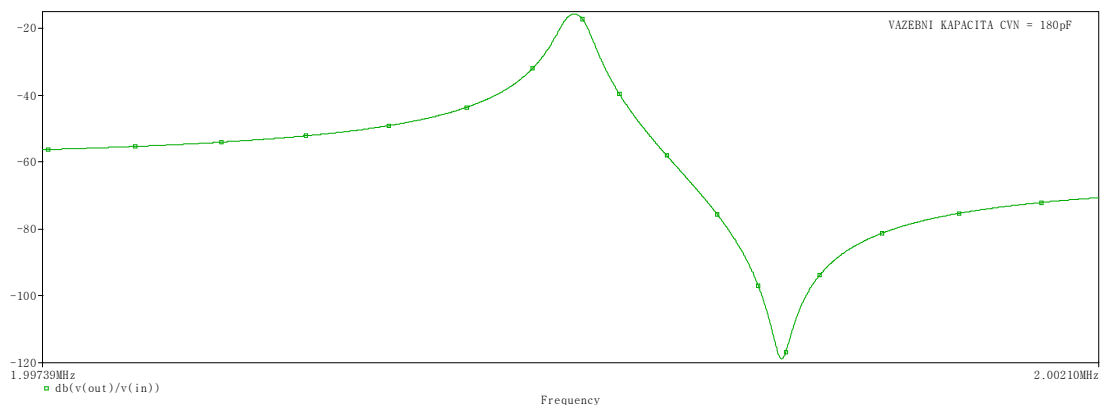
$$B_1(C_V=33\text{pF}) = 310,027 \text{ Hz}$$

- 4) S vazební kapacitou  $C_V = 33\text{pF}$  má kmitočtový filtr šířku pásma  $B_1 = 310,027 \text{ Hz}$ . Požadovaná šířka propustného pásma filtru je  $B_2 = 130 \text{ Hz}$ . Podle vztahu (4.6.1.4) se vypočítá nová přibližná hodnota vazební kapacity  $C_{VN}$ .

$$C_{VN} = C_V \cdot \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^2 = 33 \cdot \left( \frac{310,027}{130} \right)^2 = 187,68 \text{ pF}$$

Z řady E12 se vybere odpovídající kapacita  $C_{VN} = 180 \text{ pF}$ . Opět je nutno přepočítat hodnoty vstupní a výstupní impedance filtru (4.6.1.2).

$$R = \frac{k \cdot 10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot C_V} = \frac{0,613 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 2 \cdot 180} = 271 \Omega$$



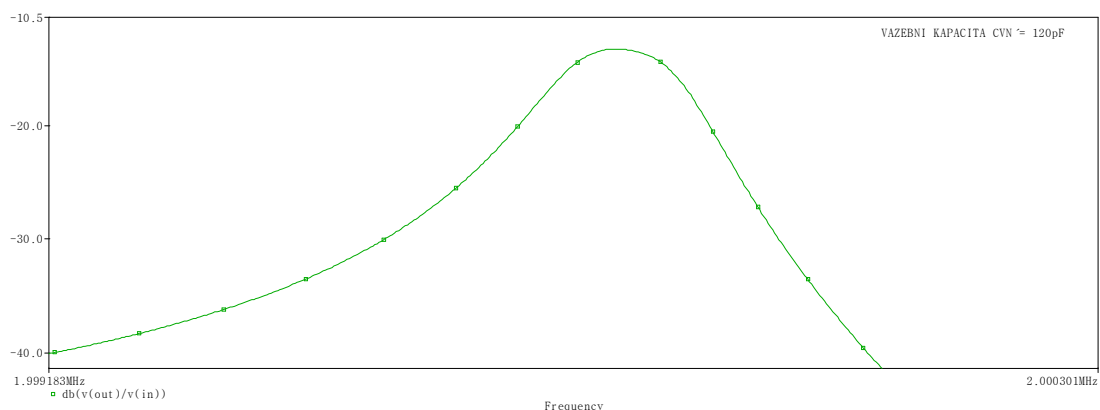
Obr. 4.24 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou  $C_{VN}$

$$B_1(C_V=180\text{pF}) = 101,811\text{ Hz}$$

Použitím vazební kapacity  $C_{VN} = 180\text{ pF}$  nebylo dosaženo požadované šířky pásma. Pro dosažení větší šíře se zvolí kondenzátor s menší kapacitou.

$$C_{VN}' = 120\text{ pF}$$

$$R = \frac{k \cdot 10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot C_V} = \frac{0,613 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 2 \cdot 120} = 406,5\ \Omega$$



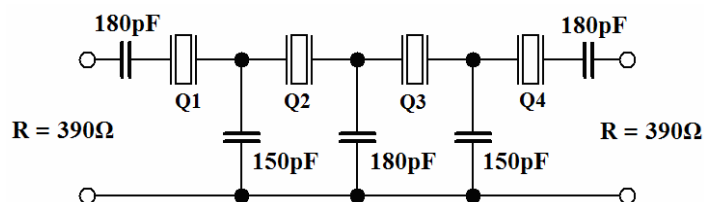
Obr. 4.25 Kmitočtová charakteristika testovacího filtru s vazební kapacitou  $C_{VN}'$

$$B_1(C_{VN}'=120\text{pF}) = 134,837\text{ Hz}$$

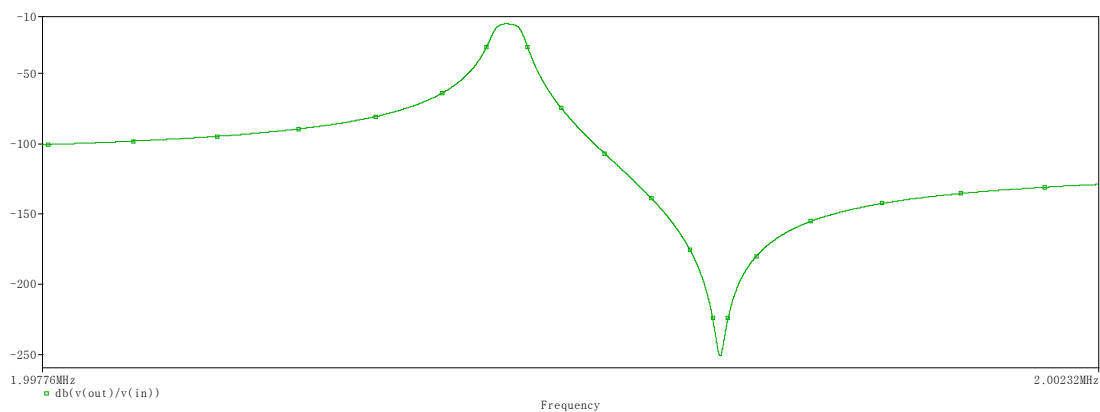
- 5) S vazební kapacitou  $C_{VN} = 120\text{ pF}$  již bylo dosaženo požadované šířky pásma  $B = 134,837\text{ Hz}$ . Pomocí vztahu (4.6.1.5) se vypočte hodnota kapacity  $C$ . Pro výpočet se použije zaokrouhlená hodnota odporu  $R$  z posledního testu.

$$C = \frac{10^6}{2\pi \cdot f_S \cdot R} = \frac{10^6}{2\pi \cdot 2 \cdot 390} = 204,044\text{ pF}$$

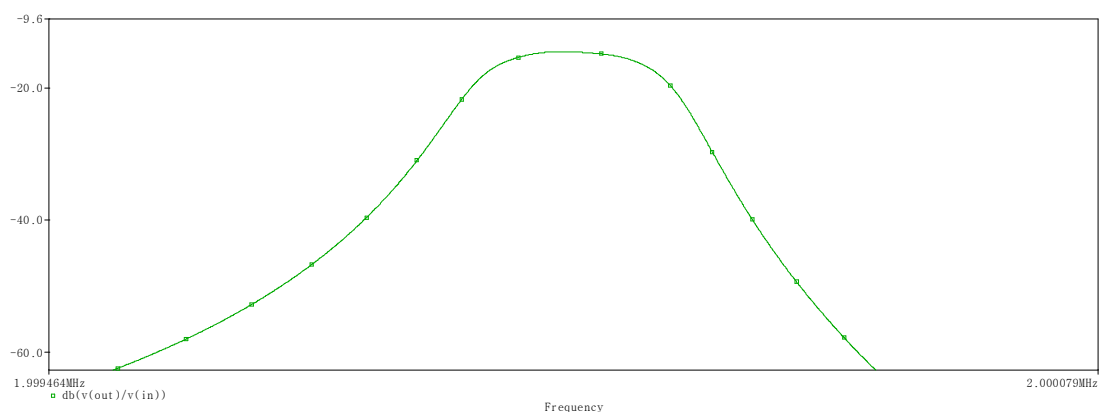
- 6) Skutečné hodnoty vazebních kapacit pro konkrétní zvolené zapojení se získají vynásobením kapacity  $C$  a koeficientem kondenzátoru na příslušné pozici. Zapojení navrženého kmitočtového filtru 4. řádu je na obrázku (**Obr. 4.27**).



Obr. 4.26 Schéma zapojení navrženého filtru s reálnými hodnotami součástek



Obr. 4.27 Frekvenční charakteristika navrženého filtru 4. řádu



Obr. 4.28 Propustné pásmo navrženého filtru

Parametry navrženého filtru:

význačný kmitočet:  $f_s = 1,9998 \text{ MHz}$

šíře propustného pásma pro pokles o -3 dB:  $B_1 = 97,388 \text{ Hz}$

šíře propustného pásma pro pokles o -6 dB:  $B_2 = 123,635 \text{ Hz}$

## 4.7 Návrh příčkového filtru pomocí programu FILTER DESIGN

Tento program nabízí mnoho způsobů řešení návrhu krystalových filtrů. Součástí programu je rozsáhlá nápověda, ve které jsou teoreticky shrnuty poznatky o krystalech a návrh krystalového filtru.

### 4.7.1 Postup návrhu (FILTER DESIGN)

- 1) Počáteční krok vychází ze znalosti parametrů krystalu, kterými lze daný obvod popsat. Metody návrhu představují kombinace těchto parametrů.

- 2) V druhém kroku je potřeba stanovit počet krystalů, ze kterých bude filtr sestaven. V programu je nutno zadat šířku propustného pásma B a maximální dovolené zvlnění v propustném pásmu. Při volbě šíře pásma je lepší zvolit trochu větší hodnotu, než je požadována. Prováděné výpočty součástek mají určitou odchylku. Simulace jsou však přesné.
- 3) Nyní jsme vyzváni programem k volbě konkrétního zapojení vazby. Program dále nabídne výchozí hodnotu vstupní a výstupní impedance. Při požadavku přizpůsobení filtru na jinou hodnotu impedance je programem přidán do zapojení přizpůsobovací LC obvod a vypočte hodnoty součástek.
- 4) Nakonec program zobrazí schéma zapojení krystalového filtru a vypočítané parametry součástek. Pro kontrolu se provede zobrazení simulační charakteristiky.

#### 4.7.2 Provedení návrhu (FILTER DESIGN)

- 1) Frekvenční filtr bude navržen na základě znalosti parametrů jeho náhradního zapojení. Hodnoty je možné odečíst z katalogového listu<sup>[14]</sup> nebo se získají proměřením krystalu, viz kapitola [4.4].
 
$$R_S = 400 \, \Omega$$

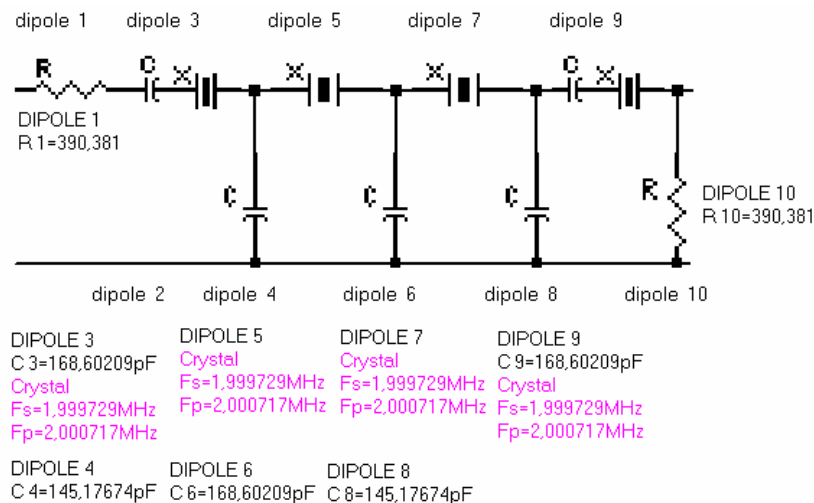
$$L_S = 0,91536 \, \text{H}$$

$$C_S = 0,00692021 \, \text{pF}$$

$$C_P = 7 \, \text{pF}$$
- 2) Bylo zvoleno, že filtr bude složen ze čtyř krystalů. Dále je potřeba zvolit šířku propustného pásma a přípustné zvlnění v propustném pásmu.
 
$$\text{order} = 4$$

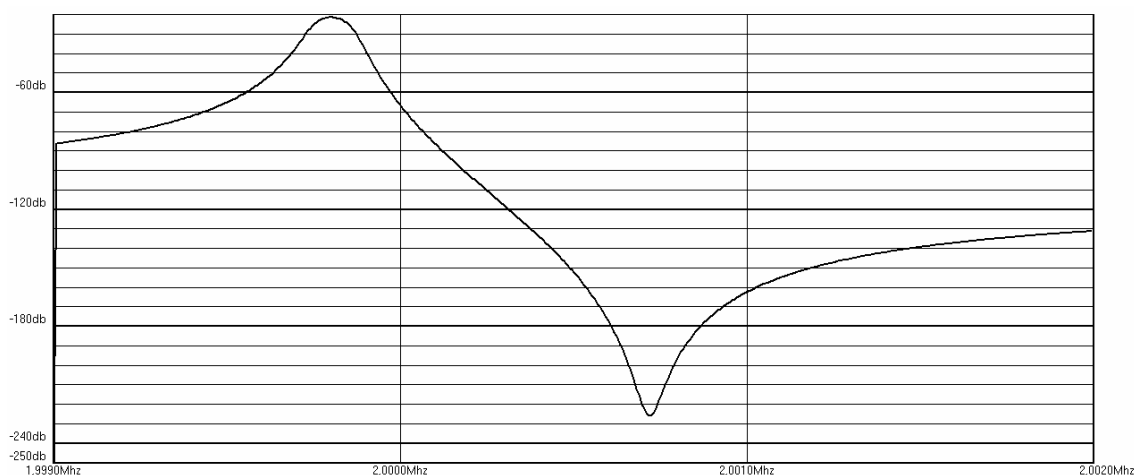
$$\text{bandwidth} = 130 \, \text{Hz}$$

$$\text{apass} = 1 \, \text{dB}$$
- 3) Byla vybrána kapacitní vazba mezi krystaly s impedančním zakončením pomocí rezistorů (výchozí nastavení).
- 4) Program spočítá hodnoty. Schéma návrhu zapojení je na obrázku (**Obr. 4.29**). Hodnoty kapacit a rezistorů se zaokrouhlí pomocí příslušných výrobních řad. Zapojení je na obrázku (**Obr. 4.32**). Kontrola návrhu se provede zobrazením simulačních charakteristik (**Obr. 4.30**), (**Obr. 4.31**).

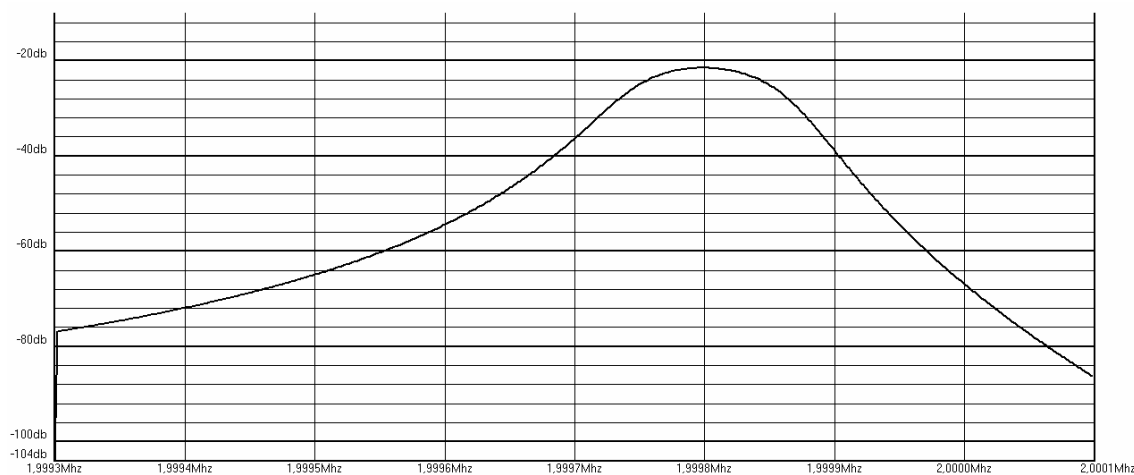


Obr. 4.29 Programem navrhnuté schéma zapojení s hodnotami součástek

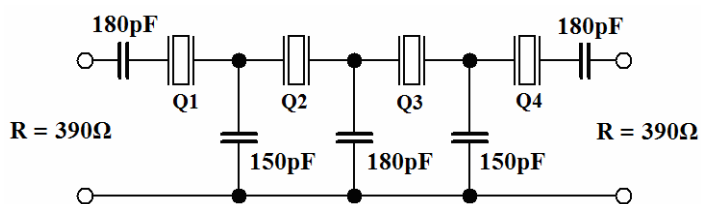




Obr. 4.30 Programová simulace - frekvenční charakteristika navrženého filtru



Obr. 4.31 Programová simulace - propustné pásmo navrženého filtru



Obr. 4.32 Schéma zapojení navrženého filtru s reálnými hodnotami součástek

Parametry navrženého filtru:

význačný kmitočet:  $f_s = 1,9998 \text{ MHz}$

šíře propustného pásma pro pokles o -3 dB:  $B_1 = 93 \text{ Hz}$

šíře propustného pásma pro pokles o -6 dB:  $B_2 = 126 \text{ Hz}$

## 4.8 Impedanční přizpůsobení

Pro dosažení správné funkce krystalových filtrů je nutno zajistit impedanční přizpůsobení na svorkové impedance krystalového filtru, za cenu zvýšení vložného útlumu filtru. Výstupní impedance zdroje budícího signálu a impedance zátěže by měly korespondovat s hodnotami  $Z_{in}$  a  $Z_{out}$  filtru. Nedodržení impedančních poměrů má za následek zvlnění frekvenční

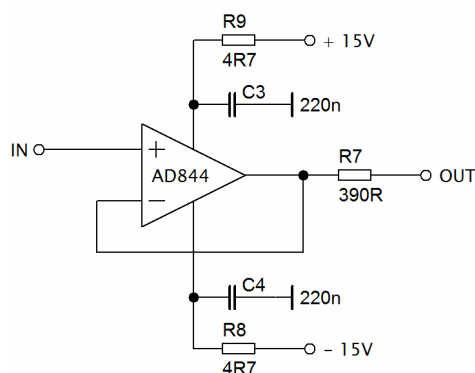
charakteristiky v propustném pásmu. Další nežádoucí změnou je změna význačného kmitočtu  $f_s$  filtru a nedodržení hodnot skupinového zpoždění. K transformaci impedance lze použít rezonanční LC obvod. Vlivem konečné hodnoty velikosti činitele jakosti použité cívky nemusí být dosaženo potřebných parametrů pro impedance přizpůsobení.<sup>[3]</sup>

### 4.8.1 Napěťový sledovač

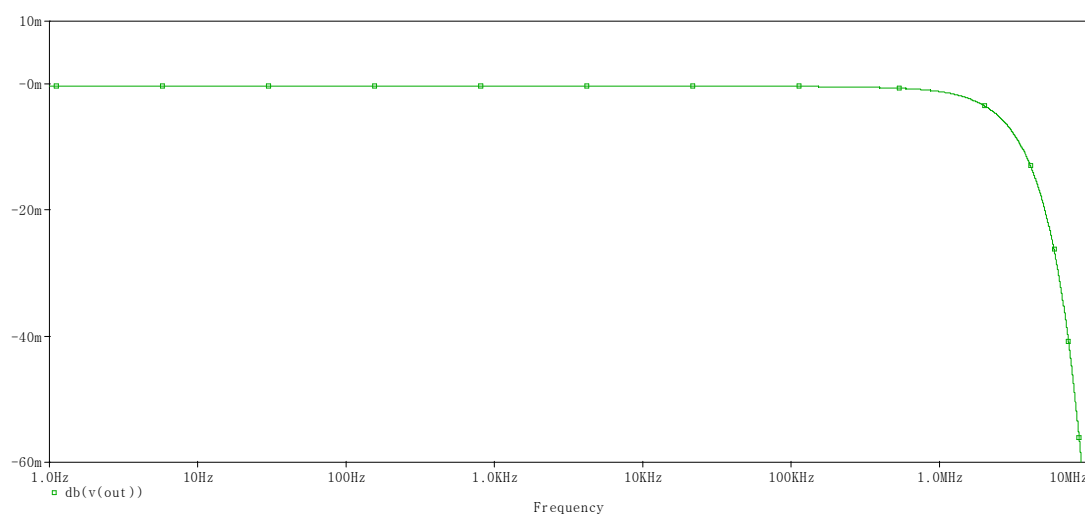
Konfigurace napěťového sledovače vychází ze zapojení neinvertujícího zesilovače. Vstupní signál je přiveden na neinvertující vstup OZ. Operační zesilovač je realizován obvodem AD844<sup>[18]</sup>. Pro simulace byl použit model, který poskytl výrobce<sup>[19]</sup>. Zavedením přímé záporné zpětné vazby (ZZV) je zesílení rovno 1 (4.8.1.1), výstupní napětí kopíruje vstupní napětí (4.8.1.2). Výkonové zesílení může být značné. Vlivem velkého vstupního odporu (řádově MΩ) a malému výstupnímu odporu (desítky Ω) se napěťový sledovač používá jako impedance transformátor. Rezistorem  $R_7$  se nastaví potřebná výstupní impedance 390 Ω. Hodnoty blokovacích kondenzátorů  $C_3$  a  $C_4$  a rezistory  $R_8$  a  $R_9$  v napájecích větvích byly zvoleny v souladu s doporučením výrobce. Zapojení napěťového sledovače s hodnotami součástek je na obrázku (Obr. 4.33).

$$Au = 1 \quad (4.8.1.1)$$

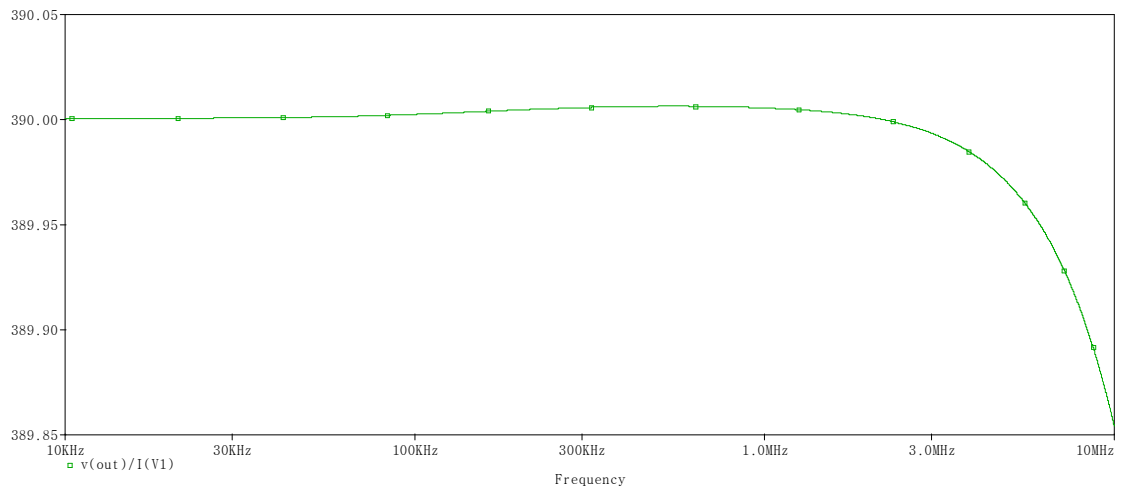
$$Au = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow U_1 = U_2 \quad (4.8.1.2)$$



Obr. 4.33 Napěťový sledovač



Obr. 4.34 Frekvenční charakteristika napěťového sledovače a AD844



Obr. 4.35 Frekvenční závislost výstupní impedance  $Z_{out}$  napěťového sledovače

## 4.8.2 Invertující zesilovač

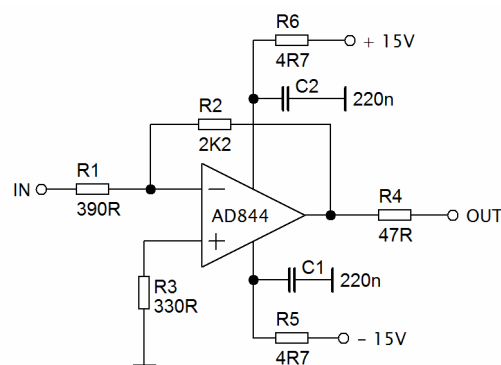
Výstupní invertující zesilovač kompenzuje navýšení vložného útlumu filtru vlivem přizpůsobení. Vstupní odpor zapojení je určen rezistorem  $R_1$ . Napěťové zesílení je dáno poměrem  $R_2$  a  $R_1$ , rezistor  $R_2$  představuje ZZV. Rezistor  $R_4$  slouží jako ochrana výstupu. Zapojení invertujícího zesilovače je zobrazeno na obrázku (**Obr. 4.36**).

$$R_{VST} = R_1 = 390 \, \Omega$$

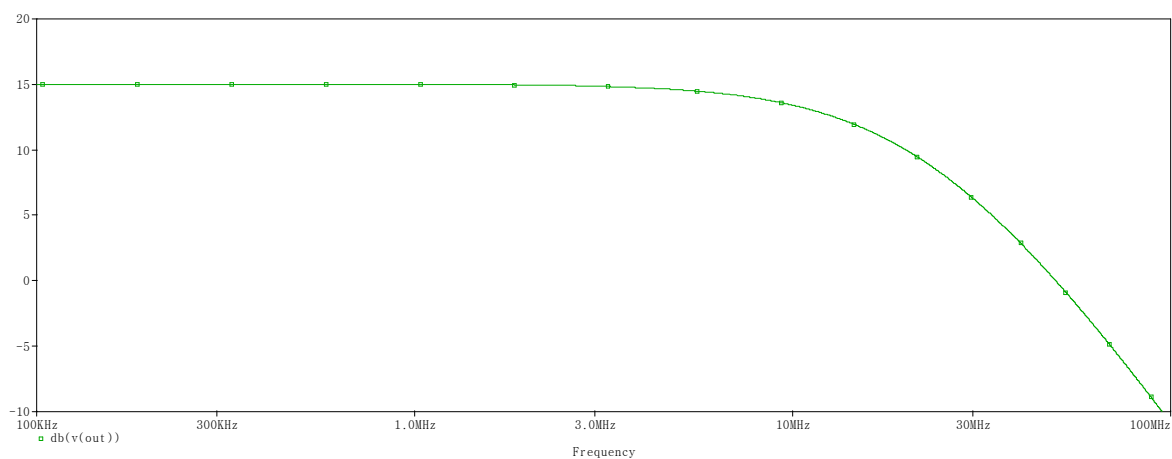
$$G = 15 \, dB \Rightarrow Au = 10^{\frac{15}{20}} = 5,623$$

$$Au = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = Au \cdot R_1 = 5,623 \cdot 390 = 2192,97 \, \Omega \approx 2,2 \, k\Omega$$

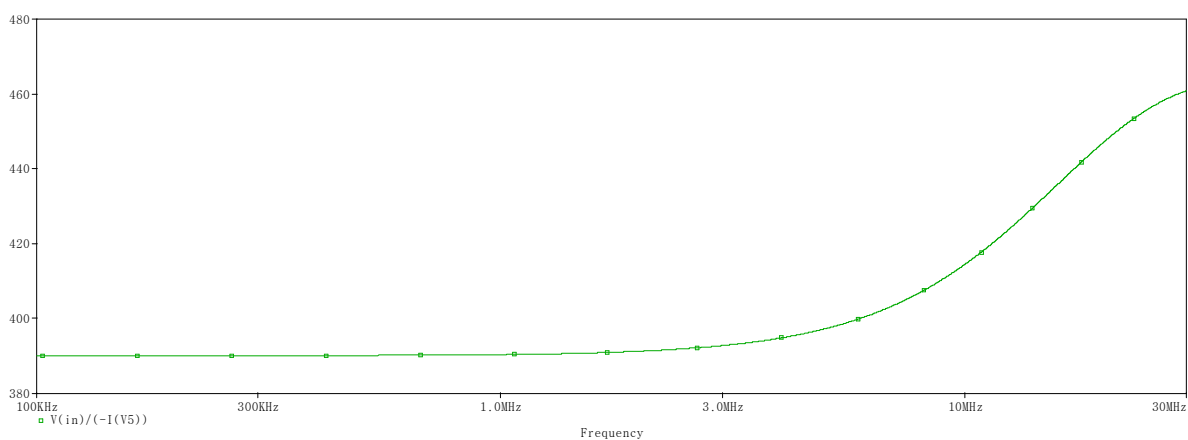
$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{390 \cdot 2200}{390 + 2200} = 331,27 \, \Omega \approx 330 \, \Omega$$



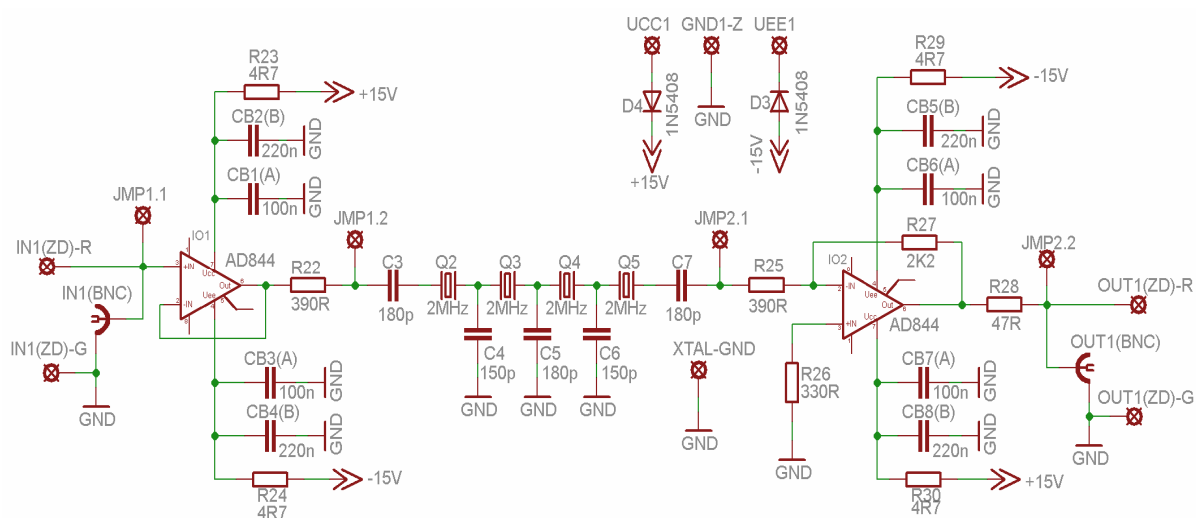
Obr. 4.36 Invertující zesilovač



Obr. 4.37 Frekvenční charakteristika invertujícího zesilovače a AD844








Obr. 4.38 Frekvenční závislost vstupní impedance  $Z_{in}$  zesilovače



Obr. 4.39 Celkové zapojení krystalového filtru

## 5 KERAMICKÉ FILTRY

Keramické filtry se vyskytují ve vysokofrekvenčních zesilovačích (VFZ), kde jimi byly nahrazeny dříve používané LC filtry. Keramické filtry mají podobné vlastnosti jako křemenné krystalové filtry, mají také shodné náhradní schéma (**Obr. 4.3**). Paralelní kapacita  $C_p$  je větší, než u krystalových rezonátorů ( $C_d$ ). Oproti nim mají nevýhodu většího útlumu v propustném pásmu, který je možno kompenzovat dodatečným zesílením signálu. Navíc mají parazitní přenos na harmonických kmitočtech, který se odstraní použitím pomocného rezonančního obvodu (**Obr. 5.2**). Základem filtru je piezokeramický rezonátor (**Obr. 5.3**) – keramické tělísko, které je na obou koncích opatřeno elektroakustickými měniči M1 a M2. Elektrický signál je vstupním měničem přeměněn na akustický – ultrazvuk, který je přenesen keramickým tělískem k výstupnímu měniči, kde dochází k opětovné přeměně na elektrický signál. Keramickým médiem je přenášena prostorová akustická vlna. Keramický filtr získá své elektrické vlastnosti, až dodatečným vytvořením orientovaných domén polarizací. Na určitých frekvenčních pásmech pracuje keramický rezonátor v různých vibračních módech (**Obr. 5.1**).

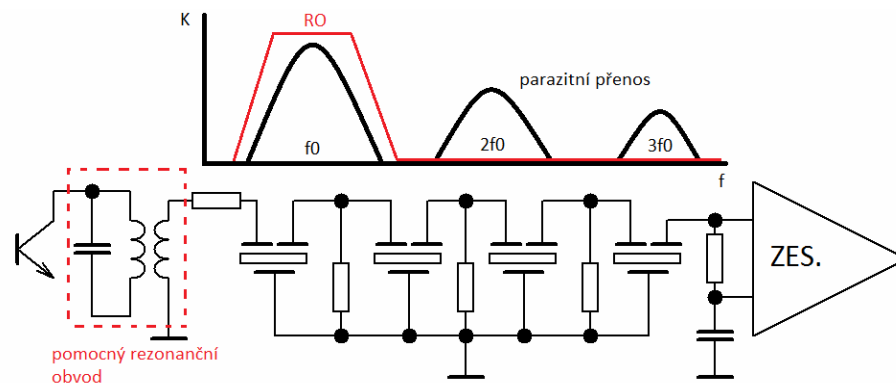
Frequency (Hz)		1k	10k	100k	1M	10M	100M	1G
Vibrating mode								
Flexural mode		■	■					
Length mode				■	■			
Area expansion mode				■	■			
Thickness shear mode					■	■		
Thickness expander mode					■	■	■	

Obr. 5.1 Vibrační módy rezonátoru <sup>[13]</sup>

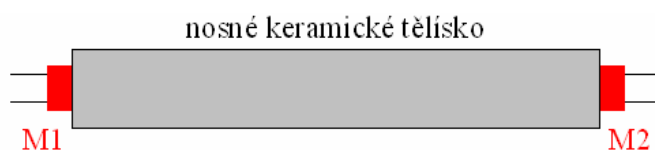
Nosné tělísko je vyrobeno ze syntetické piezoelektrické keramické hmoty – tzv. PZT keramika. Použitý materiál musí splňovat podmínku dobré šířitelnosti ultrazvuku bez útlumu. Není žádoucí, aby keramické tělísko obsahovalo nehomogenity (bublinky, prasklinky). Velikost nosného tělíska je spojena s rychlostí ultrazvuku, která je o několik řádů menší, než rychlost elektromagnetického vlnění, proto budou rozměry keramického tělíska relativně malé. Rychlost šíření je dána vztahem (5.1) <sup>[10]</sup>

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r}}, \quad (5.1)$$

kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m) a  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m). Použitými materiály jsou zásadně ovlivněny vlastnosti keramických filtrů. Při srovnání s krystalovými filtry mají mnohem nižší činitel jakosti Q, horší teplotní a časovou stabilitu, způsobenou stárnutím materiálu. Výrobní rozptyl parametrů je také vyšší. Jejich výrobní procedura je méně náročnější. Použitím keramického filtru je možno docílit větší šířky pásma B, než při použití krystalového filtru. Účinnost výroby keramických filtrů není příliš vysoká, proto se vývoj začal orientovat na filtry s povrchovou akustickou vlnou. <sup>[10][13][12]</sup>



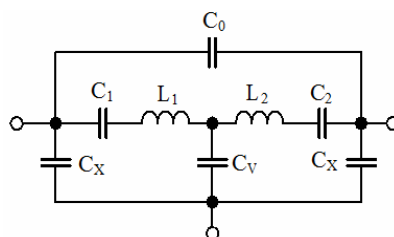
Obr. 5.2 Kompenzace parazitního přenosu RO <sup>[10]</sup>



Obr. 5.3 Piezokeramický rezonátor <sup>[10]</sup>

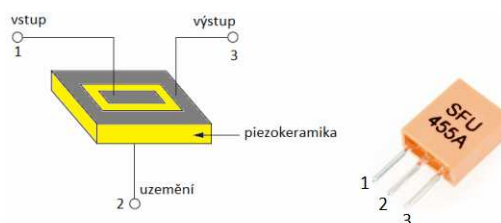
## 5.1 Monolitický piezokeramický filtr

Monolitické filtry představují vyšší technologický stupeň piezoelektrických rezonátorů. Základem je piezokeramický čip opatřený elektrodami, které pojí mechanická vazba. Velikost této mechanické vazby závisí na vzdálenosti mezi elektrodami. Princip přenosu energie byl vysvětlen v předchozí kapitole. Vlastnosti monolitického filtru se znázorní náhradním zapojením (**Obr. 5.4**), které představuje dvojbran.



Obr. 5.4 Náhradní obvod monolitického filtru <sup>[21]</sup>

V obvodu jsou obsaženy dva sériové rezonanční obvody  $L_1C_1$  a  $L_2C_2$ . Podobně jako u náhradního schématu piezokeramického rezonátoru je v tomto obvodu zahrnuta parazitní kapacita  $C_0$ , která představuje svodovou kapacitu mezi vstupní a výstupní elektrodou filtru.  $C_0$  má za následek zhoršení vlastností propustného pásma, proto by měla být její hodnota co nejmenší. Vazebním kondenzátorem  $C_V$  je charakterizována vzájemná vazba mezi rezonačními obvody  $L_1C_1$  a  $L_2C_2$ . Kondenzátory  $C_X$  představují vstupní a výstupní parazitní kapacitu mezi vrchní a spodní elektrodou jejich hodnoty jsou téměř totožné. Filtry v monolitickém provedení se uplatňují v radiokomunikačních zařízeních. <sup>[3]</sup>



Obr. 5.5 Struktura filtru pro 455 kHz <sup>[20]</sup>

### 5.1.1 Přibližné určení parametrů monolitického filtru

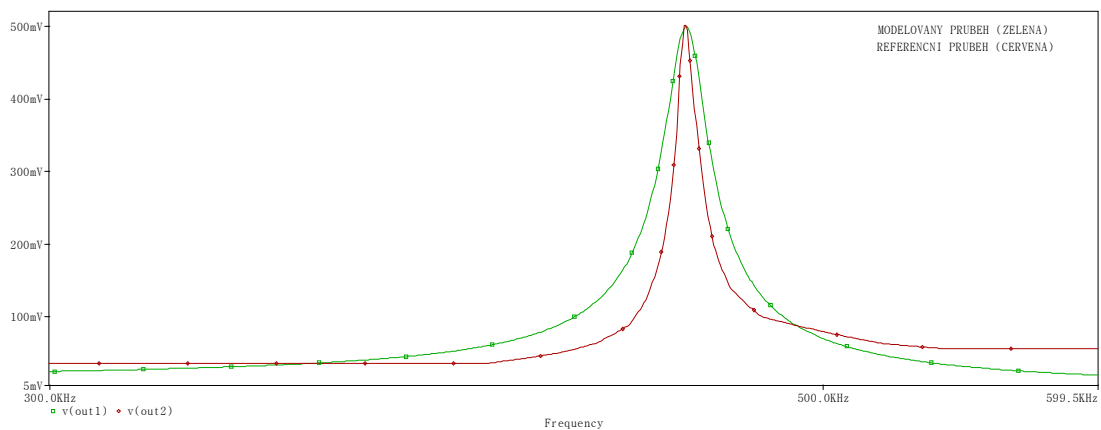
Byl vytvořen textový model monolitického filtru (*Obr. 5.6*). Vytvořený model obsahuje náhradní zapojení monolitického filtru a interní zdroj napětí řízený napětím. Zdrojem napětí je modelován referenční průběh výstupního napětí. Referenční průběh byl získán z proměření frekvenční charakteristiky keramického filtru. Parametrickým rozmítáním byly stanoveny hodnoty jednotlivých prvků obvodu. Porovnání obou průběhů je znázorněno na obrázku (*Obr. 5.7*). Průběhy nejsou totožné. Tato metoda není zcela jednoznačná. Nalezené hodnoty reprezentují jedno možné řešení. Proto je nutno je brát s určitou rezervou.

```
*náhradní model monolitického filtru
*kapacita držáku (C0)-----
*výstupní parazitní kapacita (CX2)-----
*vstupní parazitní kapacita (CX1)-----
*vazební kapacita (CV)-----
*LC obvod2-----
*LC obvod1-----
*refoutput-----
*gnd-----
*output-----
*input-----
.SUBCKT CERAMIC_FILTER 1 5 6 7 params: C1=1n L1=1n C2=1n L2=1n C3=1n C4=1n C5=1n C6=1n
C1 1 2 {C1}
C2 4 5 {C2}
C3 3 6 {C3}
C4 1 6 {C4}
C5 5 6 {C5}
C6 1 5 {C6}
L1 2 3 {L1}
L2 3 4 {L2}
R1 2 6 100meg
R2 3 6 100meg
R3 4 6 100meg
E1ap 7 6 FREQ {V(1)}= (400k,-29,12) (420k,-26,69) (430k,-24,82) (440k,-21,48)
+ (445k,-18,74) (450k,-14,54) (454k,-9,04) (455k,-7,50)
+ (456k,-6,55) (457k,-6,76) (458k,-7,56) (460k,-9,93)
+ (465k,-14,58) (470k,-17,23) (480k,-20,28) (490k,-21,67)
+ (500k,-22,95) (520k,-24,26) (540k,-25,00)
.ENDS
```

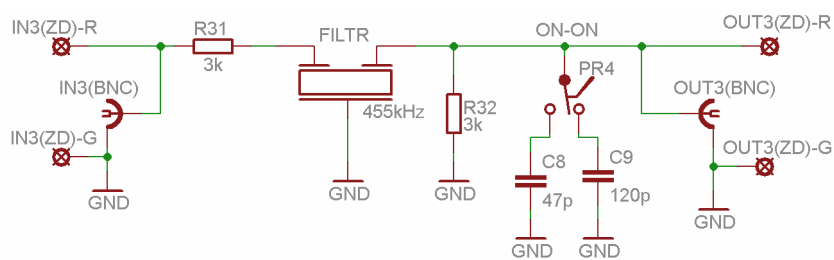
Obr. 5.6 Model monolitického filtru

Přibližně nalezené parametry monolitického filtru;

sériová kapacita  $C_1 = 0.1231$  pF  
sériová kapacita  $C_2 = 0.1231$  pF  
kapacita držáku  $C_0 = 0.09$  pF  
vazební kapacita  $C_V = 8.68$  pF  
vstupní svodová kapacita  $C_{X1} = 0.00001$  pF  
výstupní svodová kapacita  $C_{X2} = 0.00001$  pF  
sériová indukčnost  $L_1 = 1$  H  
sériová indukčnost  $L_2 = 1$  H



Obr. 5.7 Porovnání výstupních průběhů napětí modelů



Obr. 5.8 Zapojení keramického filtru



## 6 FILTRY S AKUSTICKOU POVRCHOVOU VLNOU (SAW –SURFACE ACOUSTIC WAVE)

Filtry s povrchovou akustickou vlnou (**Obr. 6.1**) jsou koncipovány na základním principu keramických filtrů. Filtr se chová jako pásmová propust, jeho frekvenční charakteristika je zobrazena na obrázku (**Obr. 6.2**). Mechanické kmity jsou vytvářeny dvojicí elektromechanických měničů M1 a M2. Vzniklé vlnění se vytváří pouze na povrchu piezoelektrického substrátu. Tato povrchová část se nazývá aktivní oblast (**Obr. 6.3**). Elektrický signál je přiveden na interdigitální měnič, který je napařen přímo na substrát. Nejčastěji je použit měnič hřebínkového tvaru (**Obr. 6.4**). Geometrickým uspořádáním měniče je tvarována útlumová a fázová charakteristika filtru. Změnami rozměrů a dalšími přídatnými prvky lze měnit tvar těchto charakteristik. Akustické vlnění se šíří po povrchu materiálu určitou rychlostí k výstupnímu měniči. Sousední elektrody měniče mají opačně orientovaný potenciál. Vzniká mezi nimi nehomogenní elektrické pole, které je časově proměnné. Elektrickým polem je vytvořeno mechanické napětí, které se šíří jako povrchová akustická vlna. Rychlost šíření vln je srovnatelná s rychlostí akustických vln ve volném prostředí. Materiál je nutno opracovat v patřičném řezu vzhledem k osám, aby bylo docíleno malého útlumu kmitů v materiálu. V uvedené tabulce jsou znázorněny rychlosti šíření v určitých materiálech.

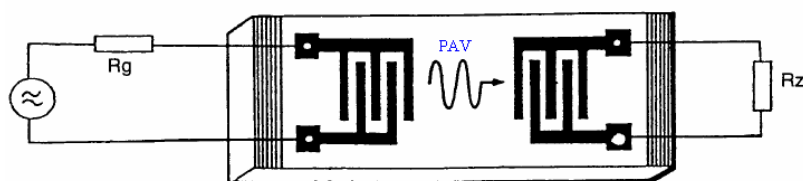
Tabulka 3 Rychlost šíření v materiálu<sup>[10]</sup>

materiál	Rychlost šíření [m.s <sup>-1</sup> ]
LiNbO <sub>3</sub>	3488
Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>	1700
Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>	1708

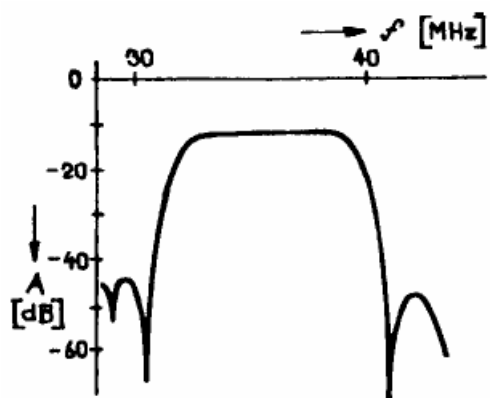
Roztečí sousedních elektrod měniče a rychlostí šíření kmitů je určen význačný kmitočet  $f_s$  (střední frekvence) propustného pásma (6.1)

$$f_s = \frac{v}{A}, \quad (6.1)$$

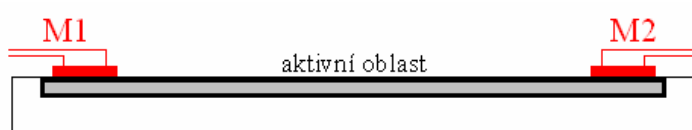
kde  $v$  je rychlost akustické vlny a  $A$  je vzdálenost ramen. Šířka propustného pásma  $B$  je určena počtem elektrod měniče. Větším počtem budících elektrod se zvyšuje účinnost buzení vln. Ne všechny vlny se šíří po povrchu aktivní oblastí k druhému měniči. Proto jsou na okrajích destičky umístěny tlumící plošky z absorpčního materiálu, kterými jsou nechtěné odrazy pohlceny. Vložením absorpčních článků nechtěně ztratíme část vybuzevané energie, které se projevuje jako vložný útlum. Modernější řešení zabránění odrazu vln je docíleno pomocí žlábkových reflektorů. Ty odrážejí dopadající vlny směrem k výstupnímu měniči ve vhodné fázi. SAW filtry se používají v pásmu 20 MHz až do 2 GHz.<sup>[9][10][12][13]</sup>



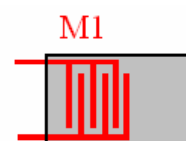
Obr. 6.1 Struktura SAW filtru<sup>[12]</sup>



Obr. 6.2 Frekvenční charakteristika SAW filtru<sup>[9]</sup>



Obr. 6.3 Aktivní oblast SAW filtru<sup>[10]</sup>



Obr. 6.4 Tvar měniče<sup>[10]</sup>

## 7 ZÁVĚR

Práce se zabývá vlastnostmi kmitočtových filtrů založených na jiných fyzikálních principech. Práce je rozdělena do několika samostatných kapitol, které se zabývají právě jednotlivým typem filtru. Teoretické části kapitol se zabývají principy funkce a částečně i technologií výroby daných filtrů. Tato koncepce byla volena z důvodu ucelenější představy o zpracovávaném tématu. Největší pozornost je kladena na krystalové a keramické rezonátory. Jsou zde naznačeny možnosti měření náhradních parametrů krystalového rezonátoru. Podstatná většina návrhů krystalových filtrů se opírá o znalost náhradních parametrů. Pomocí dvou odlišných způsobů byl navrhnout příčkový krystalový filtr čtvrtého řádu se shodnými parametry. Výsledné navržené filtry s reálnými hodnotami součástek byly totožné a hodnoty součástek se shodovaly, dílčí výsledky se dle předpokladu odlišovaly. Navrhovaný krystalový filtr měl mít sériový rezonanční kmitočet  $f_s = 2$  MHz. Navržený filtr rezonoval na frekvenci  $f_s = 1,999745$  MHz, odchylka od navrhovaného kmitočtu je  $-0,013\%$ . Navrhovaný filtr měl mít šířku pásma  $B_{-6dB} = 130$  Hz, navržený filtr měl šíři pásma pro definovaný pokles  $B_{-6dB} = 150$  Hz, zde byla odchylka  $+15,4\%$ . Bylo dosaženo potlačení 32 dB. Součástí návrhů byly prováděné simulace. Pro realizaci simulací byl vytvořen vlastní model krystalu. Model charakterizoval principiální podstatu funkce danou hodnotami náhradních parametrů obvodu, parazitní vlastnosti v něm nebyly zahrnuty. Referenční hodnoty těchto parametrů byly získány měřením; sériová kapacita  $C_s = 2,490 \cdot 10^{-3}$  pF, sériová indukčnost  $L_s = 9475,960$  H, sériový odpor  $R_s = 19,96$  k $\Omega$  a paralelní kapacita  $C_p = 1,232$  pF. Jejich hodnoty se více přibližovaly hodnotám získaných z katalogového listu, než hodnotám získaných simulační metodou měření. Paralelně se simulačními návrhy bylo prováděno reálné měření na prototypch přípravků pro ověření správnosti simulací. Výsledky měření na těchto prototypch zde nejsou uvedeny. Práce obsahuje až výsledky měření na konečné verzi laboratorního přípravku. Simulované hodnoty se shodují s reálným chováním skutečného obvodu s drobnými odchylkami. Na základě teoretických poznatků byla vytvořena laboratorní úloha zahrnující rozebíranou tematiku, která je umístěna v přílohách. Součástí laboratorní úlohy je teoretický úvod, postup měření, změřené hodnoty s příklady výpočtu, grafické závislosti a zhodnocení měření. Aby byla úloha měřitelná v laboratorních podmínkách bylo třeba navrhnout kompenzační odvody. Obvody pro impedanční přizpůsobení příčkového filtru. Byl navržen napěťový sledovač s IO AD844 a invertující zesilovač ze ziskem  $G = 15$  dB rovněž s IO AD844. Pro kompenzaci vložného útlumu krystalového rezonátoru, byl navržen neinvertující zesilovací stupeň se ziskem  $G = 40$  dB s IO OP37G. Fotografie laboratorního přípravku je k dispozici v příloze.

Příloha práce taktéž obsahuje kompletní realizaci prototypu laboratorního přípravku. Jsou zde přehledně uvedeny motivy desek plošných spojů, osazovací plány a rozpisky součástek. Dále jsou zde uvedeny výrobní podklady pro konstrukci vrchního panelu přípravku.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HÁJEK, Karel; SEDLÁČEK, Jiří. *Kmitočtové filtry*. Praha : BEN-technická literatura, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] WASYLUK, Rostislav. *Elektro technologie*. Praha : Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 2004. 367 s. ISBN 80-7183-306-1.
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 6. díl : Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat*. Praha : BEN-technická literatura, 2009. 272 s. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [4] *Oklike.c-a-v.com* [online]. c2011 [cit. 2011-12-13]. Přičkové filtry. Dostupné z WWW: <<http://oklike.c-a-v.com/soubory/filtry.htm>>.
- [5] *Giangrandi.ch* [online]. c2005 [cit. 2011-12-13]. Crystal parameters calculator. Dostupné z WWW: <<http://www.giangrandi.ch/electronics/crystalfilters/xtaltest.html>>.
- [6] *Filter Design* [program]. Ver. 4.5. Dostupné z WWW: <<http://www.aade.com/filter32/download.htm#download>>.
- [7] *Fyzmatik.pise.cz* [online]. 23. srpen 2008 [cit. 2011-12-13]. Piezoelektrický jev. Dostupné z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/72609-piezoelektricky-jev.html>>.
- [8] ŠNAJDR, V. Vysokofrekvenční a mezifrekvenční obvody KV radiostanice: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 150 s.
- [9] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry*. Brno : FEKT VUT, 2007. 137 s.
- [10] NOBILIS, Jiří. *Teorie elektronických obvodů VI.: Vysokofrekvenční zesilovače, Směšovače*. Pardubice : SPŠE a VOŠ, 2001. 112 s.
- [11] KOLKA, Zdeněk. *Počítačové řešení elektronických obvodů*. Brno: FEKT VUT, 2007. 196 s.
- [12] HANUS, S., SVAČINA, J. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Brno: FEKT VUT , 2002. 208 s., ISBN: 80-214-2222-X.
- [13] PETRŽELA, Jiří. *Jiné principy* [online prezentace]. Brno : FEKT VUT, [cit. 2011-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/jine%20principy.pdf>>.
- [14] *Ges.cz* [online]. c2011. XTAL 2,0 HC49/U. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/sheets/h/hc49u.pdf>>.
- [15] *Ges.cz* [online]. c2011 XTAL 0,032768 MTF32. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/sheets/m/mtf32.pdf>>.
- [16] *Krystaly.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-12-15]. Quartz blanks. Dostupné z WWW: <<http://www.krystaly.cz/en/Products/Wafers/Blanks>>.
- [17] *Gme.cz* [online]. c2011 OP37G. Dostupné z WWW: <<http://www.gme.cz/dokumentace/310/310-505/dsh.310-505.1.pdf>>.

- [18] *Farnell.com* [online]. c2011 AD844. Dostupné z WWW:  
<<http://www.farnell.com/datasheets/77786.pdf>>
- [19] *Farnell.com* [online]. c2011 AD844 Simulation model. Dostupné z WWW:  
<<http://cz.farnell.com/analog-devices/ad844anz/op-amp-current-feedback-dip8-844/dp/9604693>>.
- [20] LINHART, Richard. *Systémy pro vysílání a příjem hovorů* [online prezentace]. Plzeň : ZČU Katedra aplikovat elektroniky, [cit. 2011-05-14]. Dostupný z WWW:  
<[http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/TRM/rok\\_2010/linhart\\_12/broadcast.pdf](http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/TRM/rok_2010/linhart_12/broadcast.pdf)>.
- [21] KOVÁŘ, Pavel. *Filtry a jejich aplikace v radiotechnice* [online prezentace]. Praha : ČVUT FEL, [cit. 2011-05-14]. Dostupný z WWW:  
<[radio.feld.cvut.cz/courses/37KN/materialy.php?akce=dlf](http://radio.feld.cvut.cz/courses/37KN/materialy.php?akce=dlf)>.

# SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	napětový přenos
ARC	aktivní RC filtr
B	šíře frekvenčního pásma
$B_{-3dB}$	šíře frekvenčního pásma pro pokles o 3dB vztaženo k maximální hodnotě
$B_{-60dB}$	šíře frekvenčního pásma pro pokles o 60dB vztaženo k maximální hodnotě
$B_{-6dB}$	šíře frekvenčního pásma pro pokles o 6dB vztaženo k maximální hodnotě
C	kapacita
$C_d$	kapacita držáku (paralelní kapacita)
$C_s$	sériová kapacita
$C_{V(N)}$	vazební kapacita
d	piezoelektrická konstanta
DP	dolní propust
ESR	sériový odpor
$f_0$	střední frekvence
$f_m$	mezní frekvence
$f_{md}$	dolní mezní frekvence
$f_{md}$	horní mezní frekvence
$f_p$	frekvence paralelní rezonance
$f_s$	frekvence sériové rezonance
G	elektrická vodivost
HP	horní propust
ImK	imaginární část napětového přenosu
k	činitel vazby
K	napětový přenos
L	indukčnost
$L_s$	sériová indukčnost
M1,M2	elektromechanický měnič
n	řád filtru
OZ	operační zesilovač
p	dělicí poměr
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zádrž
Q	činitel jakosti
R	elektrický odpor
ReK	reálná část napětového přenosu
RO	rezonanční obvod
$R_s$	sériový odpor
S	selektivita
SW	přepínač
v	rychlost šíření vlny
VFZ	vysokofrekvenční zesilovač
$Z_{in}$	vstupní impedance
$Z_{out}$	výstupní impedance
$Z_Q(\omega)$	impedance krystalu (frekvenčně závislá)
$\epsilon_0$	permitivita vakua
$\epsilon_r$	relativní permitivita
$\sigma$	úhel řezu krystalového výbrusu
$\mu_0$	permeabilita vakua
$\mu_r$	relativní permeabilita
$\omega$	úhlový kmitočet
$\omega_0$	střední úhlový kmitočet

$\omega_d$	dolní úhlový kmitočet
$\omega_h$	horní úhlový kmitočet

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Laboratorní protokol</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Desky plošných spojů</b>	<b>47</b>
B.1	Přípravek na měření náhradních parametrů .....	47
B.2	Zesilovací stupeň .....	47
B.3	Příčkový krystalový filtr .....	47
B.4	Keramický filtr.....	48
<b>C</b>	<b>Osazovací plány</b>	<b>49</b>
C.1	Přípravek na měření náhradních parametrů .....	49
C.2	Zesilovací stupeň .....	49
C.3	Příčkový krystalový filtr .....	50
C.4	Keramický filtr.....	50
<b>D</b>	<b>Rozpiska součástek</b>	<b>51</b>
D.1	Přípravek na měření náhradních parametrů .....	51
D.2	Zesilovací stupeň .....	52
D.3	Krystalový příčkový filtr .....	52
D.4	Keramický filtr.....	54
<b>E</b>	<b>Návrh vrchního panelu přípravku</b>	<b>55</b>
E.1	Konstrukční podklady .....	56
<b>F</b>	<b>Fotografie laboratorního prototypu</b>	<b>58</b>



# A LABORATORNÍ PROTOKOL

Součástí bakalářské práce je vypracování vzorového protokolu do laboratorního měření. Laboratorní cvičení prakticky zahrnuje tematiku, která je rozebrána v předchozích kapitolách. Studenti se během měření seznámí s vlastnostmi krystalových a keramických prvků zejména ve frekvenční oblasti.

## Filtry založené na jiných fyzikálních principech

### Laboratorní úloha

#### Zadání

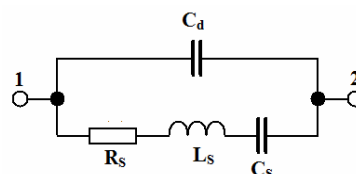
- 1) Proměřte frekvenční charakteristiku přičkového krystalového filtru 4. řádu. Na základě výsledků měření posuďte jeho kvalitu.
- 2) Pozorujte ovlivnění rezonanční frekvence sériovou kapacitou. Určete hodnoty součástí náhradního obvodu krystalového rezonátoru MTF32.
- 3) Změřte frekvenční charakteristiku keramického filtru SFU455A. Ověřte parazitní přenosy keramického filtru. Stanovte následek nedodržení hodnoty zatěžovací kapacity.

#### Teoretický úvod

Z obvodového hlediska představuje krystalový rezonátor sériový rezonanční obvod s velkým činitelem jakosti, který dosahuje hodnot  $10^5$  až  $10^6$ . Krystaly vynikají především velmi vysokou selektivitou a dobrou kmitočtovou stabilitou. Krystal můžeme znázornit pomocí úplného náhradního obvodu, který zahrnuje několik rezonančních kmitočtů. Pro praktické využití se používá obvod zjednodušený (Obr. 1.1), který reprezentuje jeden sériový kmitočet  $f_S$ . Paralelní kapacita  $C_d$  charakterizuje kapacitu držáku, ve kterém je uchycena krystalová destička. Vlivem kapacity  $C_d$  se v blízkosti sériové rezonanční frekvence  $f_S$  objevuje ještě paralelní rezonance na kmitočtu  $f_P$  (1.2), na které se vyskytuje minimální přenos krystalu. Pomocí Thomsona vztahu (1.1) můžeme vyjádřit sériovou rezonanční frekvenci krystalu.

$$f_S = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_S \cdot C_S}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

$$f_P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_S} \cdot \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_d} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$



Obr. 1.1 Náhradní model krystalu

Činitel jakosti krystalu charakterizuje vztah(1.3) :

$$Q = \frac{\omega_S \cdot L_S}{R_S} = \frac{1}{\omega_S \cdot C_S \cdot R_S} \quad [-] \quad (1.3)$$

Nevýhodou krystalu je omezená změna rezonančního kmitočtu. Sériovým zařazením kapacitoru ke krystalu ovlivníme polohu frekvence sériové rezonance  $f_S$ . Na paralelní rezonanci  $f_P$  nemá

vložený kapacitor žádný vliv. Tuto změnu lze provádět pouze v omezeném rozsahu. Pomocí níže uvedených vztahů vypočítáme parametry náhradního zapojení krystalu za podmínky  $C_1 > C_2$ .

$f_S$  - sériová rezonanční frekvence samotného krystalového rezonátoru

$f_{S(C1)}$  - sériová rezonanční frekvence s kapacitorem C1

$f_{S(C2)}$  - sériová rezonanční frekvence s kapacitorem C2

$f_P$  - paralelní rezonanci krystalového rezonátoru

$$C_S = \frac{2(C_1 - C_2) \cdot (f_{S(C2)} - f_S) \cdot (f_{S(C1)} - f_S)}{f_S \cdot (f_{S(C2)} - f_{S(C1)})} \quad [pF; pF, MHz] \quad (1.4)$$

$$L_S = \frac{1}{(2\pi \cdot f_S)^2 \cdot C_S} \quad [H; MHz, pF] \quad (1.5)$$

$$C_d = \frac{C_S}{2 \cdot \left( \frac{f_P}{f_S} - 1 \right)} \quad [pF; pF, MHz] \quad (1.6)$$

Při určení sériového odporu  $R_s$  vycházíme z předpokladu, že impedance sériového rezonančního obvodu má v rezonanci hodnotu sériového odporu, impedance reaktančních prvků se vyruší. Hledáme takovou velikost odporu, při které dosáhneme stejné hodnoty výstupního napětí jako při sériové rezonanci samotného krystalu.

Zapojením krystalových rezonátorů do určité struktury získáme krystalový filtr. Nejrozšířenější jsou kaskádní Čebyševovy filtry se sériovými a paralelními kondenzátory realizující funkci pásmové propusti. Použití krystalových filtrů má smysl v oblasti sériové rezonance. Vlastnosti filtrů lze popsat činitelem tvaru  $k$  (1.7), který určuje strmost boků frekvenční charakteristiky. Selektivitou  $S$  (1.8) je schopnost filtru vybrat ze směsice signálů požadovaný signál.

$$k = \frac{B_{-60dB}}{B_{-6dB}} \quad [-] \quad (1.7) \quad S = \frac{B_{-6dB}}{B_{-60dB}} \quad [-] \quad (1.8)$$

Činitel tvaru $k$ [-]	Posouzení kvality filtru
1	Ideální filtr
1,1 – 1,5	Kvalitní filtr
1,6 – 2,5	„Středně kvalitní filtr“
2,6 – 4,0	„Méně kvalitní filtr“

Keramické filtry mají podobné vlastnosti jako krystalové filtry, mají také shodné náhradní schéma (Obr. 1.1). Paralelní kapacita  $C_p$  je větší, než u krystalových rezonátorů ( $C_d$ ). Mají parazitní přenos na harmonických kmitočtech. Základem filtru je piezokeramický rezonátor, který je na obou koncích opatřen elektroakustickými měniči M1 a M2. Měníče zajišťují přeměnu elektrického signálu na akustický a naopak. Použité materiály zásadně ovlivňují vlastnosti keramických filtrů. Při srovnání s krystalovými filtry mají mnohem nižší činitel jakosti  $Q$ , horší teplotní a časovou stabilitu, způsobenou stárnutím materiálu. Použitím keramického filtru můžeme docílit větší šířky pásma  $B$ , než při použití krystalového filtru.

## Postup měření

Generátor Agilent 33220 nastavte do režimu vysoké impedance (Utility→OUT set→high Z→done). Přípravek je nutno napájet po dobu měření stejnosměrným symetrickým napětím  $\pm 16\text{V}$ . Zdíčky pro napájení jsou umístěny v pravém horním rohu přípravku.

### Měření na krystalovém filtru

**Ad1:** Amplitudu budicího signálu nastavte **500 mV**. Na vstup filtru IN1(BNC) a kanál CH1 osciloskopu (panelové zdíčky) přiveďte sinusový signál z generátoru. Výstup filtru OUT1 (BNC) připojte na kanál CH2 osciloskopu. Výstupní napětí odečítejte z osciloskopu. Proměřte frekvenční charakteristiku příčkového krystalového filtru 4. řádu v rozsahu kmitočtu **1,99960 – 1,99987 MHz**, frekvenční krok si zvolte, doporučená hodnota **10 – 20 Hz**. V oblasti rezonance měřte podrobněji. Změřenou závislost vyneste graficky  $A_u=f(f)$ . Za filtrem je zapojený ještě výstupní zesilovač se ziskem **G = 15 dB**. Nezapomeňte tuto zahrnout do výpočtu napěťového přenosu. Z frekvenční charakteristiky odečtete šířku propustného pásma **B<sub>-6</sub>** (pokles o 6 dB) a **B pro největší pokles co naměříte**. Přibližně určete hodnotu činitele tvaru **k' (1.7)** a selektivitu **S' (1.8)**. Na základě znalosti činitele tvaru posuďte kvalitu měřeného příčkového filtru (viz. teoretický úvod - tabulka).

### Měření náhradních parametrů krystalu MTF32

**Ad2:** Generátor ponechte v režimu vysoké impedance, amplitudu budicího signálu nastavte **1V** a přiveďte jej na vstup zapojení pro měření náhradních parametrů IN2 (BNC). Na vstupní zdíčky připojte CH1, výstup OUT2 (BNC) připojte na CH2 osciloskopu. Přepínač **PR1** nastavte do **polohy 0** a **PR2** do **polohy 0** a proměřte frekvenční charakteristiku samotného krystalu MTF32 ve frekvenčním rozsahu **32,7640 - 32,7659 kHz** s krokem **0,0001 kHz**. Poznamenejte si hodnotu rezonanční frekvence **f<sub>s</sub>**.

**Ad3:** Přepínač **PR1** ponechte v **poloze 0**, **PR2** přepněte do **polohy 1** a **PR3** nastavte do **polohy 0**. Za krystal se do série připojí kondenzátor C1 = 27pF. Proměřte frekvenční charakteristiku v rozsahu **32,7649 - 32,7668 kHz** s krokem **0,0001 kHz**, nalezněte rezonanci a poznamenejte si hodnotu rezonanční frekvence **f<sub>s(C2)</sub>**.

**Ad4:** Přepínače **PR1** a **PR2** ponechte v **poloze 0**, **PR3** přepněte do **polohy 1**. Chování krystalu ovlivňuje sériový kondenzátor C2 = 10pF. Proměřte frekvenční charakteristiku v rozsahu **32,7653 - 32,7672 kHz** s krokem **0,0001 kHz**. Opět si poznamenejte hodnotu rezonanční frekvence **f<sub>s(C1)</sub>**.

Změřené závislosti  $A_u = f(f)$  vyneste do společného grafu. Výstupní signál je zesílen zesilovacím stupněm se ziskem **G = 40 dB**. Nezapomeňte korigovat touto hodnotou vypočtený napěťový přenos. Podle vztahů **1.4 až 1.6** stanovte hodnoty náhradního modelu krystalu. Hodnota paralelní rezonance je neměřitelná v laboratorních podmínkách, použijte hodnotu získanou simulací **f<sub>p</sub> = 32,798 kHz**.

**Ad5:** Na generátoru nastavte rezonanční frekvenci samotného krystalu **f<sub>s</sub>**, získanou v předchozím měření. Přepínač **PR1** přepněte do **polohy 1**, **PR2** do **polohy 0**. Otočným **přepínačem POT** nastavte výstupní napětí na hodnotu přibližně jakou jste změřili na rezonančním kmitočtu **f<sub>s</sub>**. Nyní přepněte přepínače **PR1** a **PR2** do polohy **OFF** (střední poloha). Do zdíček **M1** a **M2** připojte multimetr a poznamenejte si hodnotu odporu **R<sub>s</sub>**.

### Měření keramického filtru SFU455A

**Ad6:** Amplitudu budicího signálu nastavte **500 mV**. Na vstup filtru IN3(BNC) a kanál CH1 osciloskopu (panelové zdíčky) přiveďte sinusový signál z generátoru. Výstup filtru OUT3 (BNC) připojte na kanál CH2 osciloskopu. Přepínač **PR4** přepněte do **polohy 1**. Zatěžovací kapacita C1 je nastavena podle doporučení výrobce C1 = 47pF. Proměřte kmitočtovou charakteristiku keramického filtru v rozmezí kmitočtů **400 – 540 kHz**. Přepínač **PR4** přepněte do **polohy 0**, hodnota zatěžovací kapacity je C1 = 120pF. Na stejných kmitočtech proměřte frekvenční charakteristiku a vyneste ji graficky  $A_u = f(f)$ . Porovnejte rozdíl mezi průběhy.

**Ad7:** Přepínač **PR4** vraťte do polohy **1** a změřte přenos na harmonických kmitočtech. Přesné hodnoty kmitočtů s tolerančním rozsahem jsou uvedeny v tabulce.

## Vypracování

### Ad1:

$$U_1 = 500 \text{ mV}$$

f [MHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]	f [MHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]
1,999563	7,56	-36,41	-51,41	1,999745	306,70	-4,25	-19,25
1,999600	16,56	-29,60	-44,60	1,999753	301,60	-4,39	-19,39
1,999620	27,25	-25,27	-40,27	1,999765	284,40	-4,90	-19,90
1,999645	58,12	-18,69	-33,69	1,999775	271,90	-5,29	-20,29
1,999655	81,25	-15,78	-30,78	1,999795	228,10	-6,82	-21,82
1,999665	114,10	-12,83	-27,83	1,999815	143,80	-10,82	-25,82
1,999685	207,80	-7,63	-22,63	1,999825	101,60	-13,84	-28,84
1,999695	245,30	-6,19	-21,19	1,999835	64,75	-17,75	-32,75
1,999705	271,90	-5,29	-20,29	1,999855	30,31	-24,35	-39,35
1,999715	290,60	-4,71	-19,71	1,999875	17,19	-29,27	-44,27
1,999735	303,10	-4,35	-19,35	1,999915	7,75	-36,19	-51,19

$$Au' = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{7,56}{500}\right) = -36,41 \text{ dB}$$

$$Au = Au' - G = -36,41 - 15 = -51,41 \text{ dB}$$

$$k' = \frac{B - 60 \text{ dB}}{B - 6 \text{ dB}} \cong \frac{352}{150} = 2,346 [-]$$

$$S' = \frac{B - 6 \text{ dB}}{B - 60 \text{ dB}} \cong \frac{150}{352} = 0,426 [-]$$

### Ad2:

$$U_1 = 1 \text{ V}$$

samotný krystal							
f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]	f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]
32,7640	331,2	-9,60	-49,60	32,7650	1344,0	2,57	-37,43
32,7641	362,8	-8,81	-48,81	32,7651	1016,0	0,14	-39,86
32,7642	415,6	-7,63	-47,63	32,7652	778,1	-2,18	-42,18
32,7643	471,9	-6,52	-46,52	32,7653	625,9	-4,07	-44,07
32,7644	562,3	-5,00	-45,00	32,7654	509,4	-5,86	-45,86
32,7645	682,4	-3,32	-43,32	32,7655	437,2	-7,19	-47,19
32,7646	862,2	-1,29	-41,29	32,7656	375,9	-8,50	-48,50
32,7647	1144,0	1,17	-38,83	32,7657	328,1	-9,68	-49,68
32,7648	1531,0	3,70	-36,30	32,7658	293,9	-10,64	-50,64
32,7649	1641,0	4,30	-35,70	32,7659	262,5	-11,62	-51,62

**Ad3:**

vložená sériová kapacita C = 27pF							
f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]	f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]
32,7649	207,8	-13,65	-53,65	32,7659	550,6	-5,18	-45,18
32,7650	231,2	-12,72	-52,72	32,7660	431,4	-7,30	-47,30
32,7651	268,8	-11,41	-51,41	32,7661	351,6	-9,08	-49,08
32,7652	312,5	-10,10	-50,10	32,7662	287,9	-10,82	-50,82
32,7653	371,9	-8,59	-48,59	32,7663	243,2	-12,28	-52,28
32,7654	471,5	-6,53	-46,53	32,7664	214,9	-13,36	-53,36
32,7655	618,8	-4,17	-44,17	32,7665	192,5	-14,31	-54,31
32,7656	806,2	-1,87	-41,87	32,7666	173,4	-15,22	-55,22
32,7657	875,8	-1,15	-41,15	32,7667	151,6	-16,39	-56,39
32,7658	721,9	-2,83	-42,83	32,7668	135,9	-17,34	-57,34

**Ad4:**

vložená sériová kapacita C = 10pF							
f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]	f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au' [dB]	Au [dB]
32,7653	143,3	-16,88	-56,88	32,7663	334,2	-9,52	-49,52
32,7654	162,5	-15,78	-55,78	32,7664	271,8	-11,32	-51,32
32,7655	182,4	-14,78	-54,78	32,7665	218,2	-13,22	-53,22
32,7656	218,8	-13,20	-53,20	32,7666	182,8	-14,76	-54,76
32,7657	265,4	-11,52	-51,52	32,7667	157,6	-16,05	-56,05
32,7658	331,2	-9,60	-49,60	32,7668	138,1	-17,20	-57,20
32,7659	431,1	-7,31	-47,31	32,7669	125,9	-18,00	-58,00
32,7660	531,2	-5,49	-45,49	32,7670	108,8	-19,27	-59,27
32,7661	537,5	-5,39	-45,39	32,7671	99,4	-20,05	-60,05
32,7662	437,5	-7,18	-47,18	32,7672	90,3	-20,89	-60,89

$$Au' = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{331,2}{1000}\right) = -9,60 \text{ dB}$$

$$Au = Au' - G = -9,60 - 40 = -49,60 \text{ dB}$$

$$C_S = \frac{2(C_1 - C_2) \cdot (f_S(C_2) - f_S) \cdot (f_S(C_1) - f_S)}{f_S \cdot (f_S(C_2) - f_S(C_1))} =$$

$$= \frac{2(27 - 10) \cdot (0,0327661 - 0,0327649) \cdot (0,0327657 - 0,0327649)}{0,0327649 \cdot (0,0327661 - 0,0327657)} = 2,490 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

$$L_S = \frac{1}{(2\pi \cdot f_S)^2 \cdot C_S} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,0327649)^2 \cdot 2,490 \cdot 10^{-3}} = 9475,960 \text{ H}$$

$$C_d = \frac{C_S}{2 \cdot \left(\frac{f_P}{f_S} - 1\right)} = \frac{2,490 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \left(\frac{0,032798}{0,0327649} - 1\right)} = 1,232 \text{ pF}$$

**Ad5:**

$$R_S = 19,96 \text{ k}\Omega$$

**Ad6:**

$$U_1 = 500 \text{ mV}$$

Cl = 47 pF			Cl = 120 pF		
f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au [dB]	f [kHz]	U <sub>2</sub> [mV]	Au [dB]
400	17,50	-29,12	400	18,75	-28,52
420	23,15	-26,69	420	20,31	-27,83
430	28,69	-24,82	430	25,00	-26,02
440	42,19	-21,48	440	37,50	-22,50
445	57,81	-18,74	445	48,44	-20,28
450	93,75	-14,54	450	82,81	-15,62
454	176,60	-9,04	454	192,20	-8,30
455	210,90	-7,50	455	220,30	-7,12
456	235,20	-6,55	456	226,80	-6,87
457	229,70	-6,76	457	187,40	-8,52
458	209,40	-7,56	458	153,10	-10,28
460	159,40	-9,93	460	115,50	-12,73
465	93,31	-14,58	465	70,31	-17,04
470	68,75	-17,23	470	50,12	-19,98
480	48,44	-20,28	480	42,16	-21,48
490	41,25	-21,67	490	32,81	-23,66
500	35,62	-22,95	500	20,31	-27,83
520	30,62	-24,26	520	26,56	-25,49
540	28,13	-25,00	540	29,74	-24,51

$$Au = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{17,50}{500}\right) = -29,12 \text{ dB}$$

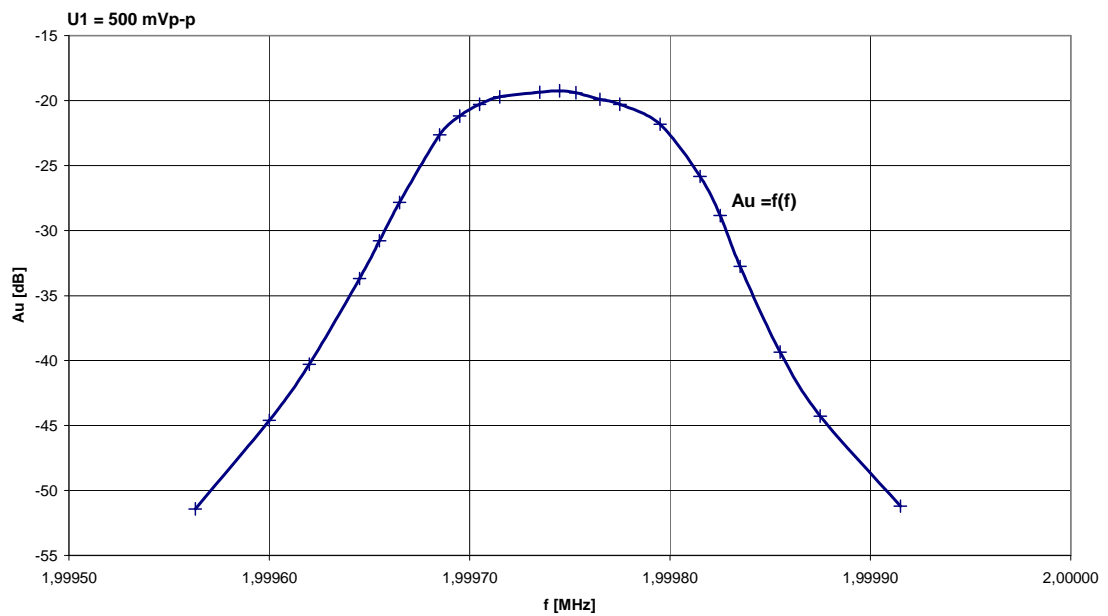
**Ad7:**

$$U_1 = 500 \text{ mV}$$

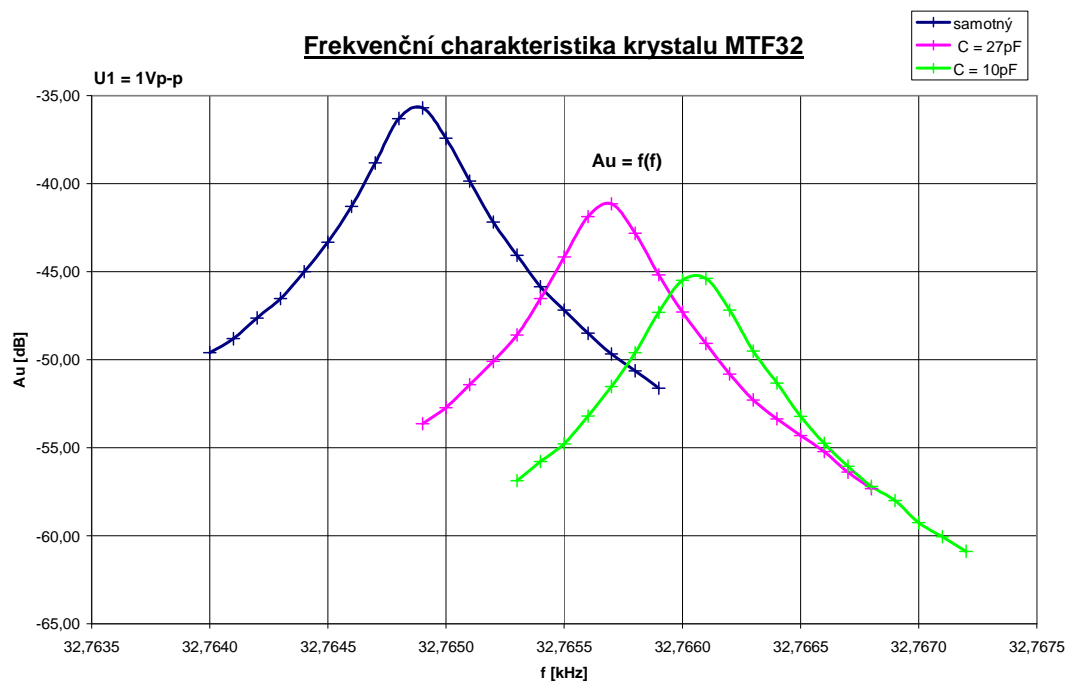
	I. Harmonická	II. Harmonická	III. Harmonická	VI. Harmonická
f (kHz)	455 (453-457)	910 (908-912)	1365 (1363-1367)	1820 (1818-1822)
U <sub>2</sub> [mV]	225,40	15,94	13,12	11,88
Au [dB]	-6,92	-29,93	-31,62	-32,48

## Grafické závislosti

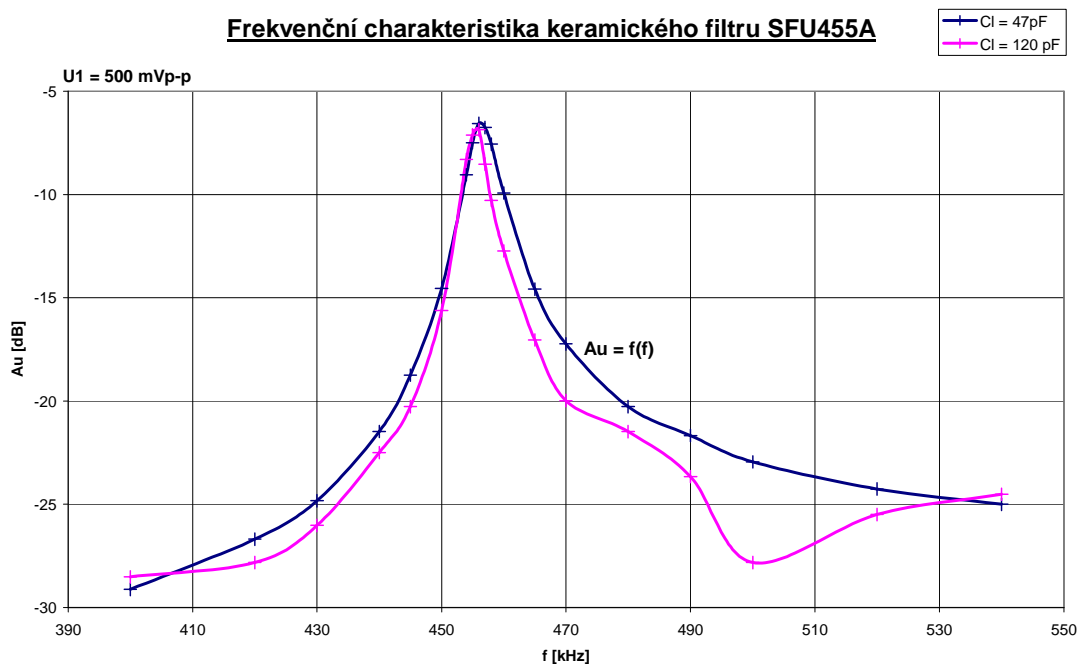
### Frekvenční charakteristika příčkového krystalového filtru



### Frekvenční charakteristika krystalu MTF32



### Frekvenční charakteristika keramického filtru SFU455A



### Použité přístroje

- generátor Agilent 33220
- osciloskop HP 54601
- laboratorní zdroj Diametral P230
- multimetr
- přípravek s filtry

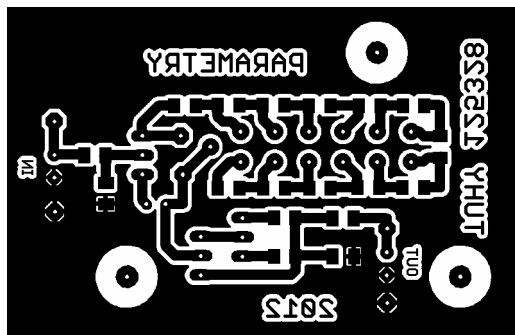
### Zhodnocení měření

Proměřená frekvenční charakteristika krystalového filtru má charakter pásmové propusti s rezonančním kmitočtem  $f_s = 1,999745$  MHz a šířkou pásma  $B_{-6dB} = 150$  Hz. Podle vypočteného činitele tvaru  $k'$  byl filtr hodnocen jako „středně kvalitní“. Z měření frekvenčních charakteristik krystalového rezonátoru MTF32 vyplývá, že vlivem sériové se mění poloha sériové rezonance. Sériovou kapacitou  $C = 10$  pF bylo dosaženo větší hodnoty sériové rezonance, zvětšil se vložný útlum krystalu. Dále byly vypočítány a změřeny hodnoty náhradního obvodu krystalu; sériová kapacita  $C_s = 2,490 \cdot 10^{-3}$  pF, sériová indukčnost  $L_s = 9475,960$  H, sériový odpor  $R_s = 19,96$  k $\Omega$ , paralelní kapacita  $C_p = 1,232$  pF. Keramický filtr SFU455A rezonuje na  $f_s = 456$  kHz. Měřením bylo ověřeno, že keramický filtr na vyšších harmonických kmitočtech prakticky nepřenáší. Nedodržení hodnoty zatěžovací kapacity má za následek zvlnění frekvenční charakteristiky a zmenšení šíře propustného pásma B. Resonanční kmitočet se téměř nezměnil.



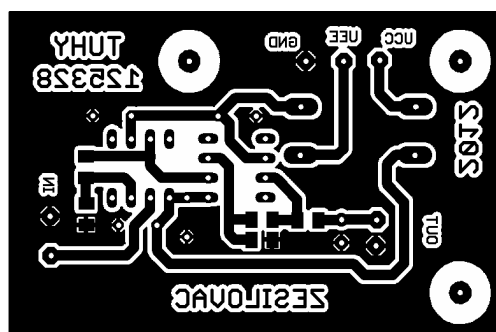
## B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

### B.1 Přípravek na měření náhradních parametrů



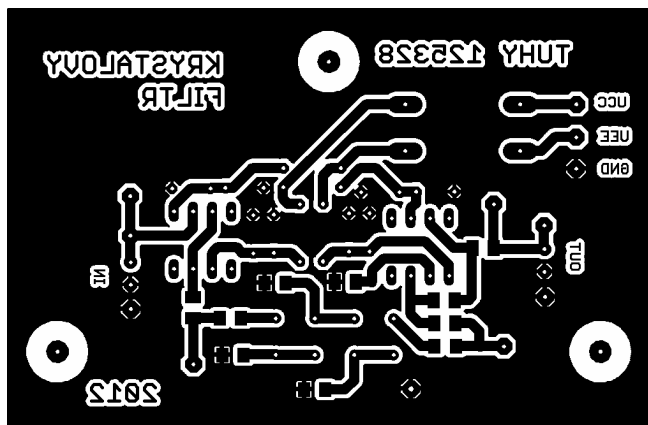
rozměr desky 68 x 44 [mm], měřítko M1:1

### B.2 Zesilovací stupeň



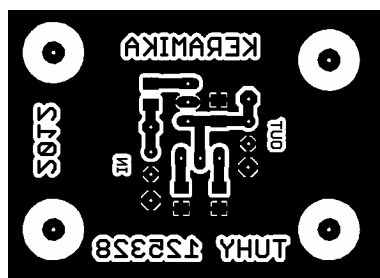
rozměr desky 66 x 43 [mm], měřítko M1:1

### B.3 Příčkový krystalový filtr



rozměr desky 86 x 56 [mm], měřítko M1:1

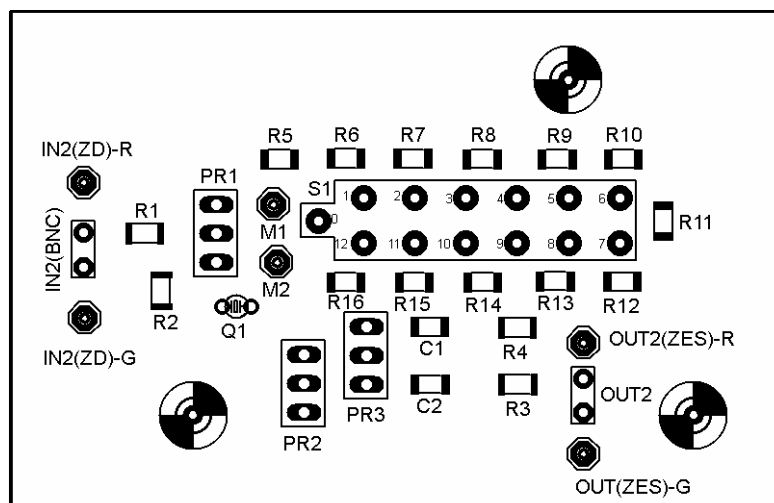
## B.4 Keramický filtr



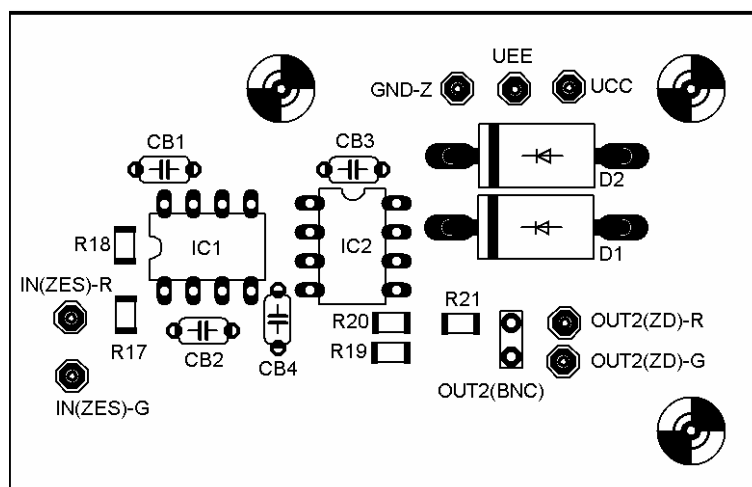
rozměr desky 50 x 36 [mm], měřítko M1:1

## C OSAZOVACÍ PLÁNY

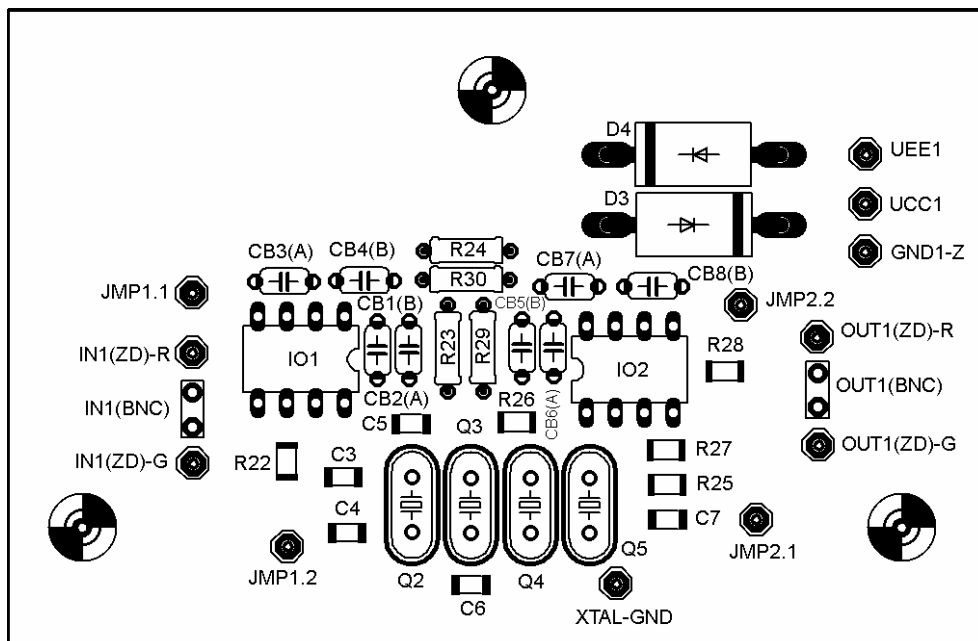
### C.1 Přípravek na měření náhradních parametrů



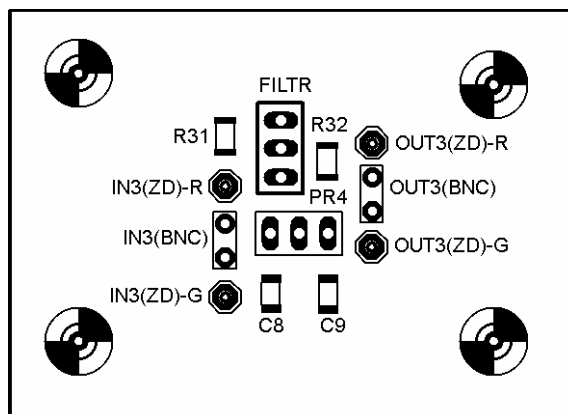
### C.2 Zesilovací stupeň



### C.3 Příčkový krystalový filtr



### C.4 Keramický filtr



## D ROZPISKA SOUČÁSTEK

### D.1 Přípravek na měření náhradních parametrů

pozice	název	typ	pouzdro/provedení	hodnota	poznámka
R1	rezistor		SMD 1206	22 $\Omega$	
R2	rezistor		SMD 1206	330 $\Omega$	
R3	rezistor		SMD 1206	330 $\Omega$	
R4	rezistor		SMD 1206	22 $\Omega$	
R5	rezistor		SMD 1206	18 k $\Omega$	
R6	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
R7	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
R8	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
R9	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
R10	rezistor		SMD 1206	1 k $\Omega$	
R11	rezistor		SMD 1206	1 k $\Omega$	
R12	rezistor		SMD 1206	1 k $\Omega$	
R13	rezistor		SMD 1206	1 k $\Omega$	
R14	rezistor		SMD 1206	1 k $\Omega$	
R15	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
R16	rezistor		SMD 1206	2 k $\Omega$	
C1	kondenzátor	keramický	SMD 1206	10 pF	
C2	kondenzátor	keramický	SMD 1206	27 pF	
Q1	krystal	MTF32	3,0x8,3mm	32,768 kHz	
PR1	přepínač páčkový	P-WT13	do panelu		on-off-on
PR2	přepínač páčkový	P-WT13	do panelu		on-off-on
PR3	přepínač páčkový	P-B068BR	do panelu		on-on
S1	přepínač otočná	P-DS1	do panelu		12 kont.
IN2(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
IN2(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
M1	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		černá
M2	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		černá
OUT2(ZES)-R	propojka	lanko			červená
OUT2(ZES)-G	propojka	lanko			modrá
OUT2	-----	-----	-----	-----	-----
IN2(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka

## D.2 Zesilovací stupeň

pozice	název	typ	pouzdro/provedení	hodnota	poznámka
IC1	OZ	OP37GPZ	DIP8		
IC2	OZ	OP37GPZ	DIP8		
R17	rezistor		SMD 1206	1,1 k $\Omega$	
R18	rezistor		SMD 1206	10 k $\Omega$	
R19	rezistor		SMD 1206	1,1 k $\Omega$	
R20	rezistor		SMD 1206	10 k $\Omega$	
R21	rezistor		SMD 1206	47 $\Omega$	
CB1	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB2	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB3	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB4	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
D1	dioda	1N5408	DO201AD		
D2	dioda	1N5408	DO201AD		
IN(ZES)-R	propojka	lanko			červená
IN(ZES)-G	propojka	lanko			modrá
OUT2(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
OUT2(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
OUT2(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka
UCC	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
GND-Z	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
UEE	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		modrá

## D.3 Krystalový příčkový filtr

pozice	název	typ	pouzdro/provedení	hodnota	poznámka
IO1	OZ	AD844	DIP8		
IO2	OZ	AD844	DIP8		
R22	rezistor		SMD 1206	390 $\Omega$	
R23	rezistor		207/7	4,7 $\Omega$	
R24	rezistor		207/7	4,7 $\Omega$	
R25	rezistor		SMD 1206	390 $\Omega$	
R26	rezistor		SMD 1206	330 $\Omega$	
R27	rezistor		SMD 1206	2,2 k $\Omega$	
R28	rezistor		SMD 1206	47 $\Omega$	
R29	rezistor		207/7	4,7 $\Omega$	

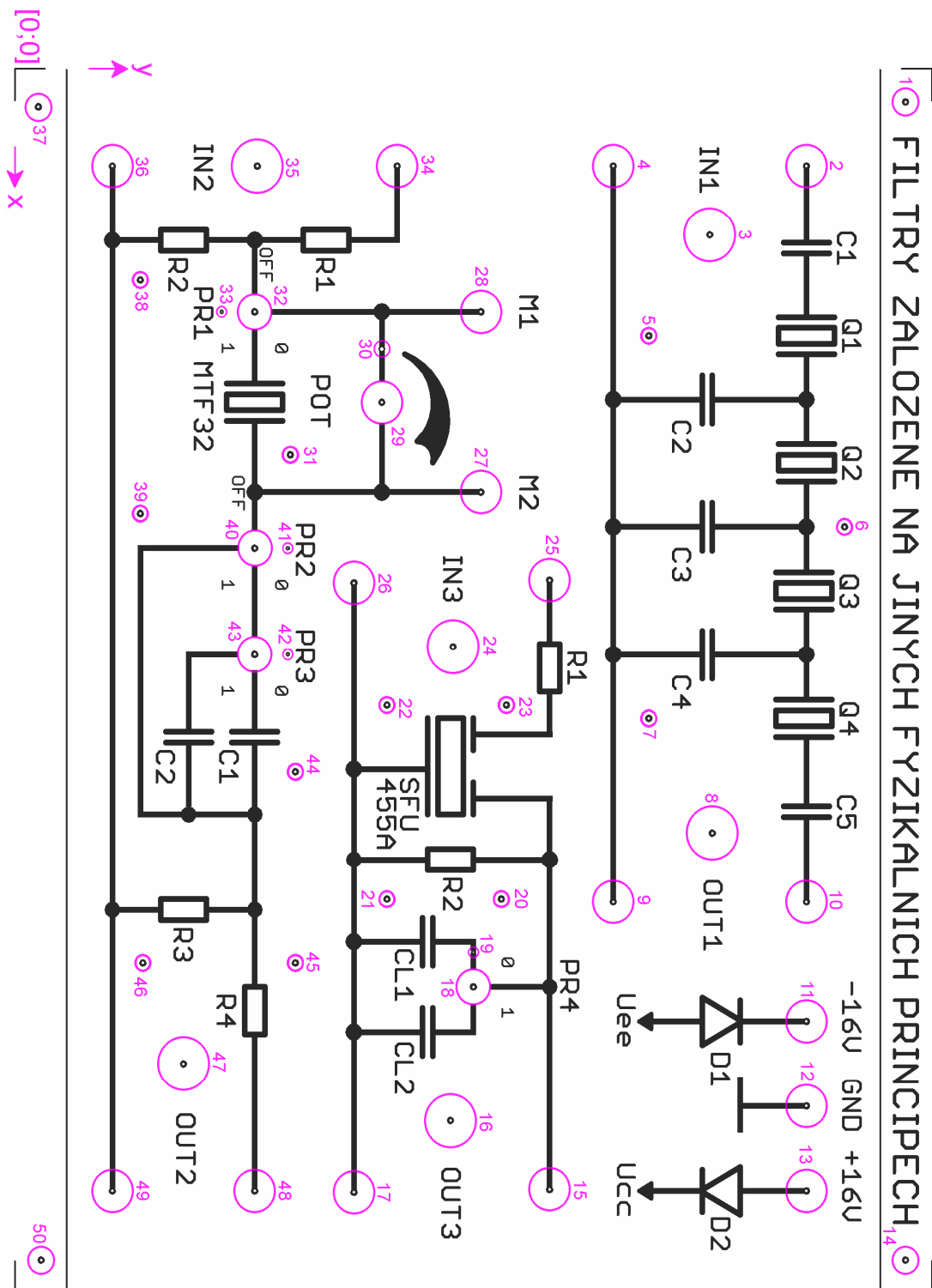
pozice	název	typ	pouzdro/provedení	hodnota	poznámka
R30	rezistor		207/7	4,7 $\Omega$	
C3	kondenzátor	keramický	SMD 1206	180 pF	
C4	kondenzátor	keramický	SMD 1206	150 pF	
C5	kondenzátor	keramický	SMD 1206	180 pF	
C6	kondenzátor	keramický	SMD 1206	150 pF	
C7	kondenzátor	keramický	SMD 1206	180 pF	
CB1(A)	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB2(B)	kondenzátor	keramický	C050	220 nF	
CB3(A)	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB4(B)	kondenzátor	keramický	C050	220 nF	
CB5(B)	kondenzátor	keramický	C050	220 nF	
CB6(A)	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB7(A)	kondenzátor	keramický	C050	100 nF	
CB8(B)	kondenzátor	keramický	C050	220 nF	
Q2	krystal	XTAL 2,0	HC49/U	2 MHz	
Q3	krystal	XTAL 2,0	HC49/U	2 MHz	
Q4	krystal	XTAL 2,0	HC49/U	2 MHz	
Q5	krystal	XTAL 2,0	HC49/U	2 MHz	
JMP1.1	kolík	S1G01	přímý		
JMP1.2	kolík	S1G01	přímý		
JMP2.1	kolík	S1G01	přímý		
JMP2.2	kolík	S1G01	přímý		
D3	dioda	1N5408	DO201AD		
D4	dioda	1N5408	DO201AD		
IN1(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
IN1(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
OUT1(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
OUT1(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
IN1(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka
OUT1(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka
UCC1	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
UEE1	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		modrá
GND1-Z	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená

## D.4 Keramický filtr

pozice	název	typ	pouzdro/provedení	hodnota	poznámka
Filtr	filtr keramický	SFU455A		455 kHz	pásmová propust
R31	rezistor		SMD 1206	3 k $\Omega$	
R32	rezistor		SMD 1206	3 k $\Omega$	
C8	kondenzátor	keramický	SMD 1206	47 pF	
C9	kondenzátor	keramický	SMD 1206	120 pF	
PR4	přepínač páčkový	P-B068BR	do panelu		on-on
IN3(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
IN3(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
OUT3(ZD)-R	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		červená
OUT3(ZD)-G	přístrojová zdířka	SBZ	pájecí		zelená
IN3(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka
OUT3(BNC)	konektor BNC	UG1094/U	přímý, do panelu	50 $\Omega$	zásuvka



## E NÁVRH VRCHNÍHO PANELU PŘÍPRAVKU



## E.1 Konstrukční podklady

číslo otvoru	pozice x [mm]	pozice y [mm]	průměr vrtáku [mm]	poznámka
1	6,1	175,1	5	šroub M5
2	18,1	155,6	8	přístrojová zdířka
3	31,1	136,6	10	konektor BNC
4	18,1	117,6	8	přístrojová zdířka
5	50,1	124,6	3	šroub M3
6	86,1	163,1	3	šroub M3
7	122,1	124,5	3	šroub M3
8	143,6	137,1	10	konektor BNC
9	156,6	117,6	8	přístrojová zdířka
10	156,6	155,6	8	přístrojová zdířka
11	179,1	155,6	8	přístrojová zdířka
12	195,1	155,6	8	přístrojová zdířka
13	211,1	155,6	8	přístrojová zdířka
14	224,1	175,1	5	šroub M5
15	210,8	105,1	8	přístrojová zdířka
16	197,8	85,6	10	konektor BNC
17	211,3	66,6	8	přístrojová zdířka
18	172,6	90,1	6,5	přepínač páčkový
19	166,1	90,1	2	zámek přepínače
20	156,1	95,6	3	šroub M3
21	156,1	73,1	3	šroub M3
22	119,6	73,1	3	šroub M3
23	119,1	96,6	3	šroub M3
24	108,6	86,1	10	konektor BNC
25	96,6	105,1	8	přístrojová zdířka
26	96,6	66,6	8	přístrojová zdířka
27	79,6	91,6	8	přístrojová zdířka
28	45,6	91,6	8	přístrojová zdířka
29	62,6	72,1	10	přepínač otočný
30	52,6	72,1	3	zámek přepínače
31	72,6	54,1	3	šroub M3
32	45,6	47,1	6,5	přepínač páčkový
33	45,6	40,6	2	zámek přepínače

<b>číslo otvoru</b>	<b>pozice x [mm]</b>	<b>pozice y [mm]</b>	<b>průměr vrtáku [mm]</b>	<b>poznámka</b>
34	18,1	75,1	8	přístrojová zdířka
35	18,1	47,6	10	konektor BNC
36	18,1	19,1	8	přístrojová zdířka
37	7,0	5,1	5	šroub M5
38	39,6	24,6	3	šroub M3
39	83,6	24,6	3	šroub M3
40	90,1	47,1	6,5	přepínač páčkový
41	90,1	53,6	2	zámek přepínače
42	110,1	53,6	2	zámek přepínače
43	110,1	47,1	6,5	přepínač páčkový
44	132,1	55,1	3	šroub M3
45	168,1	55,1	3	šroub M3
46	168,1	25,1	3	šroub M3
47	187,1	33,1	10	konektor BNC
48	211,1	47,1	8	přístrojová zdířka
49	211,1	19,1	8	přístrojová zdířka
50	224,1	5,1	5	šroub M5

## F FOTOGRAFIE LABORATORNÍHO PROTOTYPU

